

**Visão Geral sobre a Linguagem ISO**  
**de**  
**Especificação Técnica de Produtos**

José António dos Santos Almacinha

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica

2016





---

## Resumo

No atual processo geral de globalização da economia mundial, a indústria dos países desenvolvidos tem demonstrado uma tendência crescente para concentrar as suas atividades nas fases de conceção e montagem de produtos, contratando no exterior a fabricação dos respetivos componentes, numa estratégia de obtenção de custos de produção mais baixos.

Por outro lado, com o aumento do número de empresas que dependem, cada vez mais, de tecnologia baseada em sistemas computadorizados, para poderem dar resposta às necessidades crescentes de produção de peças mais sofisticadas e a preços mais reduzidos, ficaram mais condicionadas as oportunidades de interação humana com os desenhos de engenharia, no âmbito dos diferentes processos de fabricação.

Neste contexto, o Comité técnico ISO/TC 213 está a desenvolver uma nova geração da linguagem ISO de Especificação Geométrica de Produtos (GPS), na qual o sistema GPS integrado, para a especificação e a verificação da geometria de uma peça, será uma ferramenta de engenharia aperfeiçoada para o desenvolvimento e o fabrico de produtos. O objetivo deste sistema aperfeiçoado é fornecer ferramentas para uma gestão económica da variabilidade de produtos e processos.

Num tal mercado, o Sistema de especificação técnica de produtos em desenvolvimento, com o objetivo de facilitar a sua integração em sistemas 3D de CAD/CAM/CAQ, tornou-se no único meio estável de comunicação técnica no âmbito do processo de desenvolvimento de produtos.

A nível nacional, o contacto estabelecido, ao longo das últimas décadas, com um número significativo de profissionais de diferentes setores da indústria, sobretudo ao nível das pequenas e médias empresas (PMEs), permitiu registar a existência de bastantes lacunas no acesso a informação atualizada no domínio da “Especificação técnica de produtos”.

Como, nos próximos anos, é previsível que venham a ocorrer grandes desenvolvimentos ao nível das normas ISO sobre toleranciamentos, alicerçados em desenvolvimentos científicos e com a subsequente codificação de conceitos e de terminologia, a indústria debater-se-á com a magnitude de tais alterações e haverá uma grande necessidade de formação da mão-de-obra industrial e dos estudantes das escolas superiores, nestes domínios, prevendo-se que este processo se estenda pelas próximas duas décadas.

A elaboração deste trabalho de síntese resultou da perceção de que, a nível nacional, ainda não existia um documento atualizado neste âmbito, que permitisse apoiar a generalidade das PMEs que produzem produtos transacionáveis de elevado valor acrescentado, para o mercado global, e que se envolvem muitas vezes em litígios com os seus clientes e fornecedores, sobre os resultados da

---

verificação da conformidade ou da não conformidade dos produtos, derivados de especificações ambíguas existentes na documentação técnica.

A nova linguagem ISO GPS, em desenvolvimento, fornece as bases técnicas para uma abordagem integrada dos procedimentos de especificação e de verificação geométricas. Os elementos geométricos de superfície e a sua classificação com base na definição de grupos de simetria desempenham um papel assinalável nesta nova linguagem. Através de conceitos como o de “*skin model*” e o de “operadores”, a nova linguagem GPS põe a descoberto a existência de conjuntos de operações duais, nos processos de especificação e de verificação, tornando possível harmonizar o conjunto de operações (anteriormente não referidas explicitamente) envolvidas nas especificações de tolerâncias com as operações utilizadas durante o controlo das peças.

Finalmente, a generalização do conceito de incerteza pelas diferentes fases do processo de desenvolvimento de produtos permitirá uma melhor avaliação do grau de correlação entre a especificação e os requisitos funcionais, mas também das ambiguidades que existem na própria especificação e da incerteza da medição, transformando a incerteza numa ferramenta de gestão económica dos recursos a afetar aos diferentes setores da empresa (especificação, fabricação e verificação), com vista a promover a melhoria contínua da qualidade dos produtos e dos prazos de entrega.

A GPS é uma nova abordagem para a especificação de produtos, mas baseia-se em ferramentas já existentes, em particular na utilização de referências especificadas, tolerâncias geométricas e toleranciamento dos estados de superfície. A GPS sistematiza e alarga estas ferramentas existentes a uma nova metodologia, mas a compreensão dos novos conceitos é fundamental para se poder fazer uma utilização adequada das mais recentes normas de aplicação industrial.

Com este trabalho, pretende dar-se uma contribuição para uma melhor compreensão e integração destes novos conceitos ao nível do ensino, da formação e da indústria, de modo a que as empresas nacionais possam fazer um aproveitamento profícuo destas novas ferramentas de apoio ao desenvolvimento de produtos, no âmbito da nova economia global.

---

## Abstract

In the current general process of globalization of the worldwide economy, the industry of the developed countries has shown an increasing tendency to concentrate its activities on the design and assembly phases, contracting in the outside the manufacturing of its components, in order to obtain lower production costs.

On the other hand, with the increasing number of companies that depend, more and more, on computer based technology, in order to fulfil the increasing demand of highly sophisticated production workpieces at economic prices, the opportunities of human interaction with the engineering drawings in the field of the different manufacturing processes are thus reduced.

In this context, the ISO/TC 213 Technical Committee is developing the next generation of the ISO Geometrical Product Specification (GPS) language, in which the integrated GPS system for specification and verification of workpieces geometry shall become an improved engineering tool for product development and manufacturing. The objective of this improved system is to provide tools for the economic management of variability in products and processes.

In such a market, the Technical Product Specification (TPS) System now in development became the only stable means of technical communication in the product development process, in order to enable its integration in 3D CAD/CAM/CAQ systems.

At the national level, the established contacts over the past few decades with a significant number of professionals from different sectors of the Portuguese industry, especially with regard to Small and Medium Enterprises (SMEs), has allowed to record the existence of quite a few gaps in the access to updated information in the field of the "Technical Product Specification".

In the next few years, it is probable that major developments will occur regarding the ISO tolerancing standards, assisted by scientific developments and with the subsequent coding of concepts and terminology. In this context, the industry will struggle with the magnitude of such changes and there will be a great demand for training of the industrial workforce and higher education students in these fields, so this process is expected to be extended for the next two decades.

The preparation of this dissertation work resulted from the perception that, at national level, there was still no updated document in this field, allowing to support the majority of the SMEs. These companies produce tradable products with high added value for the global market and sometimes are engaged in disputes with their customers and suppliers about the results of the verification to prove the conformity or nonconformity of products, which derive from ambiguous specifications in technical documentation.

---

The new ISO GPS language, still under developing, provides the technical basis for an integrated approach to the geometrical specification and verification procedures. The geometrical surface features and their classification based on the symmetry groups play a central role in this new language. Through concepts such as "skin model" and "operators", the new GPS language lays bare the existence of sets of dual operations in the specification and verification processes, making possible to harmonize the set of feature operations (previously not referred explicitly) involved in tolerance specifications with the operations used for the inspection of workpieces.

Finally, the generalization of the concept of uncertainty by the different phases of the product development process will allow a better evaluation of the degree of correlation between the specification and the functional requirements, but also of the ambiguities that exist within the specification itself and of the measurement uncertainty, transforming the uncertainty in a economic management tool of the resources affecting the different sectors of the enterprise (specification, manufacturing and verification), in order to promote the continuous improvement of product quality and time to market.

The GPS is a new approach to the product specification, but it's based on existing tools, in particular in the use of datums, geometrical tolerances and surface textures tolerancing. The GPS systematizes and extends these existing tools to a new methodology, but the understanding of the new concepts is crucial to be able to make an appropriate use of the latest standards for industrial application.

This work intends to be a contribution to a better understanding and integration of these new concepts in the fields of education, training and industry, so that the Portuguese enterprises can make a useful use of these new tools to support the product development, in the new global economy.

---

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Prof. António Torres Marques, enquanto Diretor do DEMec, e ao Prof. João Falcão e Cunha, na sua qualidade de Diretor do MIEIG, o incentivo e o apoio manifestados, que foram muito importantes para a minha tomada de decisão de levar a cabo a preparação desta dissertação.

A todos os meus colegas da Secção de Desenho Industrial do DEMec, desejo agradecer o estímulo e o apoio que sempre me dispensaram. Em particular, quero expressar a minha gratidão ao Prof. Joaquim Fonseca, amigo e companheiro destas lides há mais de trinta anos, pelo interesse e pelo apoio prestado ao longo da execução deste trabalho.

Ao Prof. José Simões Morais, meu mestre e amigo, que foi pioneiro na introdução de muitos dos temas abordados nesta dissertação, ao nível do ensino universitário em Portugal, e com quem aprendi muito, o meu agradecimento por me ter transmitido o gosto pelos assuntos em questão e pelo forte incentivo dado à concretização desta dissertação.

A todos os colegas dos Departamentos de Engenharia Mecânica e de Engenharia e Gestão Industrial da FEUP, quero exprimir o meu apreço pelo bom ambiente de trabalho proporcionado, pela grande amizade demonstrada e pelo estímulo constante.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, o meu reconhecimento pelo apoio dispensado à minha formação e valorização científica, aproveitando a oportunidade para prestar uma sentida homenagem ao Prof. Vasco Sá e ao Prof. Guilherme Ricca Gonçalves que muito contribuíram para que pudesse ter enveredado pela atividade docente no ensino universitário.

Finalmente, quero agradecer de maneira muito especial à minha mulher, Maria José, o carinho, a paciência e a compreensão demonstradas, durante a execução deste trabalho, lamentando apenas que a minha mãe, que sempre me incentivou fortemente para que elaborasse esta dissertação, já não tivesse tido a oportunidade de assistir à sua conclusão.

---

---

# Sumário

Página

**Resumo**

**Abstract**

**Agradecimentos**

**Sumário ..... vii**

**Lista de siglas e abreviaturas ..... xix**

**Lista de símbolos ..... xxv**

**1 Introdução ..... 1**

1.1 Considerações gerais 3

1.2 Motivação e objetivos 9

1.3 Estrutura do trabalho 9

1.4 Referências 12

1.4.1 Normalização 13

**2 Introdução ao conceito de normalização em geral e sua importância na engenharia ..... 15**

2.1 Considerações gerais 17

2.2 Origens históricas e evolução 17

2.3 Objetivos e importância da Normalização 20

2.4 Diferentes tipos de normas 22

2.5 Alguns aspetos da Normalização internacional (ISO e IEC) 25

2.6 Alguns aspetos da Normalização europeia (CEN e CENELEC) 29

2.7 Alguns aspetos da Normalização nacional (IPQ) 30

2.8 Referência à atividade do INEGI enquanto ONS reconhecido pelo IPQ 32

2.9 O papel fundamental dos números normais na estruturação da Normalização em diferentes domínios 34

2.9.1 Generalidades 34

2.9.2 O estabelecimento de séries de números preferenciais 35

2.9.3 Séries de números normais 37

2.9.3.1 Séries de base 38

2.9.3.2 Séries derivadas 39

2.9.3.3 Séries desfasadas 40

2.9.4 Dimensões lineares preferenciais 40

2.9.4.1 Exemplos de aplicação 42

2.10	Considerações finais	42
2.11	Referências	44
2.11.1	Normalização	45
<b>3</b>	<b>A documentação e a especificação técnicas de produtos adequadas ao mercado global no domínio da engenharia mecânica .....</b>	<b>47</b>
3.1	Introdução	49
3.2	Visão geral sobre a evolução da representação gráfica em engenharia	51
3.3	O sistema normativo para a preparação de especificações técnicas de produtos	66
3.3.1	O estudo conceptual	67
3.3.2	Documentos normativos a considerar na preparação de uma TPS	68
3.3.2.1	Normas globais	68
3.3.2.2	Tipos de documentação	69
3.3.2.3	Relação entre a definição de conceção e a sua interpretação	69
3.3.2.4	Meios de apresentação de desenhos	70
3.3.2.5	Escalas	71
3.3.2.6	Linhas	71
3.3.2.7	Escrita	72
3.3.2.8	Métodos de projecção	72
3.3.2.9	Princípios gerais de representação	73
3.3.2.10	Referências de peças	74
3.3.2.11	Representação gráfica (abreviaturas e símbolos)	74
3.3.2.11.1	Abreviaturas	74
3.3.2.11.2	Símbolos utilizados para grandezas físicas	74
3.3.2.11.3	Símbolos gerais	75
3.3.2.11.4	Equivalentes textuais	76
3.3.2.12	Representação de elementos	76
3.3.2.13	Representação de elementos mecânicos	77
3.3.2.14	Cotagem e toleranciamento	77
3.3.2.15	Toleranciamento geométrico	78
3.3.2.16	Materiais e processos tecnológicos	79
3.3.2.17	Indicação do estado de superfície	80
3.3.2.18	Segurança, armazenamento e recuperação de documentação	80
3.3.2.19	Menções de protecção	81
3.3.3	Breves observações finais	81
3.4	A documentação técnica elaborada ao longo do processo de desenvolvimento do produto	81
3.5	Breves referências à evolução do ensino na área do “Desenho” no Curso de Engenharia Mecânica no âmbito da Universidade do Porto	89
3.6	Considerações finais	105



---

3.7	Referências	106
3.7.1	Normalização	109
<b>4</b>	<b>As bases da nova linguagem ISO de especificação geométrica de produtos ...</b>	<b>111</b>
4.1	Introdução	113
4.2	O conceito GPS	114
4.2.1	Contextualização	114
4.2.2	A atual estrutura do conceito de especificação geométrica de produtos	117
4.3	Elementos geométricos	120
4.3.1	Alguns termos gerais e definições	120
4.3.2	Elementos geométricos ideais	122
4.3.2.1	Classificação dos elementos geométricos ideais	122
4.3.2.2	Elementos compostos	125
4.3.3	Elementos geométricos não ideais	127
4.4	Características	127
4.4.1	Características intrínsecas de elementos ideais	128
4.4.2	Características de situação entre elementos de situação	129
4.4.3	Características de situação entre elementos ideais e não ideais	130
4.4.4	Parametrização da situação relativa entre elementos geométricos	131
4.4.4.1	Exemplo de aplicação	133
4.5	Breves considerações sobre a importância dos elementos geométricos na nova linguagem GPS	134
4.6	Modelo para a especificação e verificação geométricas	135
4.6.1	Objetivo e campo de aplicação	135
4.6.2	O atual conceito de especificação geométrica	135
4.6.3	O contexto da especificação geométrica	135
4.6.4	Operações para elementos geométricos	138
4.7	Métodos de especificação geométrica	144
4.7.1	Especificação por zona de tolerância	145
4.7.2	Especificação por dimensão	146
4.7.3	Comparação entre os dois métodos de especificação	147
4.8	Princípios de base do conceito GPS	148
4.8.1	O impacto da incerteza nos princípios de base	149
4.8.1.1	O impacto das ambiguidades de descrição da função e de especificação	152
4.8.1.2	O impacto das incertezas do método e de implementação	153
4.9	Processo de especificação	154
4.10	Processo de verificação	156
4.11	Considerações finais	157
4.12	Referências	157

4.12.1	Normalização	159
<b>5</b>	<b>Princípio fundamental de toleranciamento .....</b>	<b>161</b>
5.1	Introdução	163
5.2	O Princípio de independência	166
5.3	Algumas observações acerca do princípio de independência	171
5.4	Outros princípios fundamentais ISO GPS	172
5.5	Regras para a indicação de especificações GPS por omissão	174
5.6	Regras para a indicação de especificações GPS especiais	176
5.7	Considerações finais	177
5.8	Referências	179
5.8.1	Normalização	179
<b>6</b>	<b>Tolerâncias dimensionais .....</b>	<b>181</b>
6.1	Introdução	183
6.2	Conceitos de base sobre o atual toleranciamento dimensional	195
6.2.1	Definições gerais das dimensões “tamanho”	199
6.2.1.1	Elementos de tamanho linear	199
6.2.1.2	Elementos de tamanho angular	201
6.3	Tamanhos lineares	202
6.3.1	Generalidades	202
6.3.2	Tipos de tamanhos lineares	207
6.3.2.1	O requisito de envolvente	214
6.3.3	Modificadores de especificação para tamanhos	218
6.3.4	Os operadores de especificação, por omissão, para tamanhos	220
6.3.5	Exemplos de indicações nos desenhos de operadores de especificação especiais para tamanhos	222
6.3.6	A aplicação dos tamanhos por ordenação na especificação de rolamentos	224
6.3.7	Exemplo de tratamento de dados com modificadores por ordenação	227
6.4	O sistema ISO de tolerâncias para tamanhos lineares	229
6.4.1	Generalidades	229
6.4.2	Sistema de codificação ISO para tolerâncias de tamanhos lineares	230
6.4.2.1	Graus de tolerância normalizados	230
6.4.2.2	Posições do intervalo de tolerância	234
6.4.2.3	Dvios fundamentais	234
6.4.2.4	Classe de tolerância	239
6.4.2.5	Seleção de classes de tolerância	239
6.4.3	Sistema ISO de ajustamentos	241
6.4.3.1	Tipos de ajustamentos	241

6.4.3.1.1	Ajustamentos com folga	241
6.4.3.1.2	Ajustamentos com aperto	242
6.4.3.1.3	Ajustamentos incertos	243
6.4.3.2	Amplitude de um ajustamento	243
6.4.3.3	A importância dos valores médios das folgas e apertos	244
6.4.3.4	Determinação de um ajustamento normalizado	246
6.4.3.4.1	Recomendações práticas para a seleção de um ajustamento	246
6.4.3.4.2	Seleção do sistema de ajustamentos	246
6.4.3.4.3	Escolha de um ajustamento específico com base na experiência	248
6.4.3.4.4	Determinação de um ajustamento específico através de cálculo	250
6.4.3.5	Método do emparelhamento	252
6.4.3.6	A indicação de ajustamentos ISO na documentação técnica de produtos	253
6.4.3.7	Verificação de especificações de tamanhos lineares por meio de calibres de limites para peças lisas	255
6.5	Tamanhos angulares	257
6.5.1	Generalidades	257
6.5.2	Tipos de tamanhos angulares	260
6.5.3	Modificadores de especificação gerais para tamanhos	263
6.5.4	Os operadores de especificação, por omissão, para tamanhos angulares	264
6.5.5	Exemplos de indicações nos desenhos de operadores de especificação especiais para tamanhos angulares	266
6.6	Alguns exemplos das limitações do toleranciamento dimensional em dimensões que não sejam tamanhos	267
6.6.1	Generalidades	267
6.6.2	Exemplos de comparação entre especificações de toleranciamento $\pm$ ambíguo e de toleranciamento geométrico inequívoco	268
6.6.3	Exemplos de toleranciamentos ambíguos cobertos por outras normas	270
6.6.3.1	Distâncias lineares entre mais do que dois elementos de tamanho	271
6.6.3.2	Distância angular envolvendo elementos de tamanho	273
6.6.3.3	Distância angular entre dois elementos integrais	274
6.7	Considerações finais	276
6.8	Referências	280
6.8.1	Normalização	284
<b>7</b>	<b>Tolerâncias geométricas.....</b>	<b>287</b>
7.1	Introdução	289
7.2	Breve referência às propriedades macrogeométricas das superfícies	297
7.3	Conceitos de base sobre o toleranciamento geométrico	299
7.3.1	Generalidades	299
7.3.2	Símbolos e definições de tolerâncias geométricas	301

7.3.3	Indicação de elementos toleranciados	309
7.3.4	Zonas de tolerância	310
7.3.5	Indicação de referências especificadas	312
7.4	Indicação de uma especificação geométrica	314
7.4.1	Indicador de tolerância	314
7.4.1.1	Secção do “símbolo”	314
7.4.1.2	Secção da “zona de tolerância, elemento e característica”	315
7.4.1.2.1	Componentes de especificação da zona de tolerância	315
7.4.1.2.2	Componentes de especificação de um elemento toleranciado	323
7.4.1.2.3	Componentes de especificação de característica geométrica de forma	332
7.4.1.2.4	Componente de especificação da condição de matéria	336
7.4.1.2.5	Componente de especificação de estado	337
7.4.1.3	Secção de “referências especificadas”	338
7.4.2	Indicadores de elementos geométricos auxiliares	339
7.4.2.1	Planos de interseção	339
7.4.2.2	Planos de orientação	341
7.4.2.3	Elementos de direção	343
7.4.2.4	Planos de coleção	345
7.4.3	Indicações adjacentes ao indicador de tolerância	346
7.4.4	Indicação de especificações gerais, por omissão, específicas do desenho	348
7.5	Indicações complementares	349
7.5.1	Indicações de um elemento toleranciado composto ou restrito	349
7.5.1.1	Símbolos modificadores “a toda a volta” e “em toda a envolvente” – elemento toleranciado contínuo fechado	349
7.5.1.2	Elemento toleranciado indicado como zona restrita	351
7.5.1.3	Elemento toleranciado contínuo e não fechado	352
7.6	Dimensões teoricamente exatas	353
7.7	Elemento toleranciado projetado	353
7.7.1	Exemplo da indicação em desenho e sua interpretação	356
7.8	Referências especificadas	357
7.8.1	Conceitos gerais	357
7.8.2	Características intrínsecas de superfícies associadas a elementos de referência	364
7.8.2.1	Características intrínsecas numa referência especificada simples estabelecida a partir de um elemento simples	365
7.8.2.2	Características intrínsecas numa referência especificada comum estabelecida simultaneamente a partir de dois ou mais elementos simples	365
7.8.2.3	Características intrínsecas em sistemas de referências especificadas estabelecidos numa sequência definida a partir de dois ou mais elementos simples	366

---

7.8.3	Referências especificadas simples, referências especificadas comuns e sistemas de referências especificadas	366
7.8.3.1	Referências especificadas simples	366
7.8.3.2	Referências especificadas comuns	367
7.8.3.3	Sistemas de referências especificadas	369
7.8.4	A secção de “referências especificadas” do indicador de tolerância	370
7.8.4.1	Tipos de referências especificadas	371
7.8.4.2	Componentes de especificação de filtros	373
7.8.4.3	Componente de especificação do método de associação para a referência especificada	375
7.8.4.3.1	A associação de referências especificadas simples	376
7.8.4.3.2	A associação de referências especificadas comuns	377
7.8.4.3.3	Associação para sistemas de referências especificadas	379
7.8.4.3.4	A indicação do componente de especificação do método de associação	381
7.8.4.4	Componentes de especificação de uma restrição	382
7.8.4.5	Componente de especificação de elemento derivado	384
7.8.4.6	Componente de especificação da condição de matéria	385
7.8.4.7	Indicações de componentes de especificação de referências especificadas no indicador do elemento de referência	385
7.8.5	Referências parciais	386
7.8.6	Alguns exemplos de referências e sistemas de referências especificadas	390
7.9	Conceitos de base sobre operadores de especificação de características geométricas de forma	393
7.9.1	Introdução	393
7.9.2	Extração	394
7.9.2.1	Generalidades	394
7.9.2.2	Breves noções sobre o conteúdo harmónico de elementos geométricos nominais	395
7.9.2.3	O espelhamento espectral (“ <i>aliasing</i> ”) e o critério de Nyquist	397
7.9.2.4	Estratégias de extração e sua capacidade para avaliar o conteúdo harmónico	399
7.9.3	Filtragem	401
7.9.3.1	Generalidades	401
7.9.3.2	Banda de transmissão – filtros de perfil gaussianos	406
7.9.3.2.1	Filtros passa-baixo	407
7.9.3.2.2	Filtros passa-alto	408
7.9.3.2.3	Comprimentos de onda de corte	409
7.9.3.2.4	Frequências de corte em UPR	409
7.9.3.3	Sistema de apalpação	411
7.9.3.4	Alguns exemplos do papel desempenhado pela filtragem na especificação geométrica das superfícies	412

7.9.4	Associação	421
7.9.4.1	Generalidades	421
7.9.4.2	Definições matemáticas de funções objetivo para a associação	423
7.9.4.2.1	Soma mínima das distâncias	425
7.9.4.2.2	Mínimos quadrados totais	425
7.9.4.2.3	Zona mínima	426
7.9.4.2.4	Minimax (Chebyshev) com a restrição de ser exterior à matéria	426
7.9.4.2.5	Máximo inscrito	427
7.9.4.2.6	Mínimo circunscrito	428
7.9.4.3	Breves referências aos algoritmos para o cálculo de funções objetivo	429
7.10	Exemplos de indicações e definições de tolerâncias geométricas	430
7.11	Crítérios para a especificação de tolerâncias geométricas	436
7.12	Considerações finais	442
7.13	Referências	445
7.13.1	Normalização	447
<b>8</b>	<b>Requisitos de interdependência entre o tamanho e a geometria .....</b>	<b>451</b>
8.1	Introdução	453
8.2	Requisitos de interdependência: generalidades	455
8.2.1	Termos e definições	456
8.3	Requisito de máximo de matéria (MMR)	458
8.3.1	Verificação do requisito de máximo de matéria	469
8.3.2	O significado da especificação de uma tolerância geométrica zero	473
8.3.3	Algumas considerações sobre o aumento da tolerância geométrica	475
8.4	Requisito de mínimo de matéria (LMR)	480
8.4.1	O significado da especificação de uma tolerância geométrica zero	485
8.4.2	Considerações sobre o aumento da tolerância geométrica	486
8.5	Requisito de reciprocidade (RPR)	486
8.6	Relação entre a função das peças e as tolerâncias geométricas	489
8.7	Considerações finais	490
8.8	Referências	492
8.8.1	Normalização	493
<b>9</b>	<b>Tolerâncias gerais .....</b>	<b>495</b>
9.1	Introdução	497
9.2	Conceitos relativos ao toleranciamento geral de características geométricas	500
9.3	Tolerâncias gerais para peças obtidas através de processos de corte por arranque de apra (ISO 2768)	504
9.3.1	Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicações de tolerâncias individuais	504

9.3.2	Tolerâncias geométricas para elementos sem indicações de tolerâncias individuais	507
9.3.3	Exemplo de procedimento de medição para a determinação da exatidão oficial corrente	512
9.3.4	Indicações nos desenhos	515
9.3.5	Exemplo de aplicação a um desenho	516
9.4	Tolerâncias dimensionais e geométricas gerais e sobre-espessuras para trabalho mecânico para peças fundidas (ISO 8062-3)	517
9.4.1	Introdução	517
9.4.2	Cotagem nominal	518
9.4.3	Graus de tolerância	519
9.4.3.1	Graus de tolerância dimensional para peças fundidas (DCTG)	519
9.4.3.2	Graus de tolerância geométrica (GCTG)	521
9.4.3.2.1	Referências especificadas	522
9.4.4	Desencontro da superfície de apartação ou de junta (SMI)	525
9.4.5	Sobre-espessuras requeridas para trabalho mecânico (RMA)	525
9.4.6	Indicações nos desenhos	529
9.4.7	Exemplo de aplicação a um desenho	530
9.4.8	Algumas considerações gerais sobre a especificação geométrica de peças moldadas	532
9.4.9	Tolerâncias gerais para peças fundidas utilizando o toleranciamento de perfil em relação a um sistema geral de referências especificadas	534
9.4.9.1	Tolerâncias gerais	536
9.4.9.2	Sobre-espessuras requeridas para trabalho mecânico	538
9.4.9.3	Indicações nos desenhos	540
9.4.9.4	Exemplo de aplicação a um desenho	541
9.5	Tolerâncias gerais para construções soldadas (ISO 13920)	542
9.5.1	Introdução	542
9.5.2	Tolerâncias gerais	544
9.5.3	Indicações nos desenhos	546
9.6	Tolerâncias gerais relativas a outros processos de fabricação	547
9.6.1	Tolerâncias gerais para peças em chapa de aço obtidas através de corte por arrombamento e de conformação plástica	547
9.6.1.1	Tolerâncias gerais para peças obtidas através de corte por arrombamento	548
9.6.1.2	Tolerâncias gerais para peças obtidas através de conformação plástica de chapa	550
9.6.1.3	Comparação entre as tolerâncias gerais especificadas nas normas DIN 6930-2 e ISO 2768-1	551
9.6.1.4	Indicação nos desenhos	552
9.6.2	Tolerâncias gerais para peças obtidas por moldação em plástico	553
9.6.2.1	Introdução	553
9.6.2.2	Toleranciamento de peças moldadas em plástico	554
9.6.2.3	Indicação nos desenhos	557

9.7	Critério de aceitação	557
9.8	Considerações finais	560
9.9	Referências	560
9.9.1	Normalização	562
<b>10</b>	<b>Indicações dos estados de superfície.....</b>	<b>565</b>
10.1	Introdução	567
10.2	Breves referências à evolução do estudo da geometria das superfícies e da sua avaliação	573
10.3	Métodos de medição correntes dos estados de superfície	584
10.4	Generalidades sobre a indicação dos estados de superfície	589
10.5	Parâmetros caracterizadores do estado de superfície (rugosidade)	590
10.5.1	Parâmetros do perfil de rugosidade ligados à linha média	590
10.5.1.1	Parâmetros de amplitude	590
10.5.1.1.1	Parâmetros de valor médio	590
10.5.1.1.2	Parâmetros pico-vale	592
10.5.1.2	Parâmetros de espaçamento	596
10.5.1.3	Curvas e parâmetros associados	597
10.5.2	Parâmetros do perfil de rugosidade ligados aos motivos do perfil	599
10.5.3	Parâmetros ligados à curva da taxa do comprimento de sustentação	600
10.6	A importância dos estados de superfície	602
10.7	Algumas relações práticas entre diferentes parâmetros de rugosidade	604
10.8	Símbolos gráficos para as indicações dos estados de superfície	606
10.9	Composição do símbolo gráfico completo para os estados de superfície	608
10.10	Indicações das designações dos parâmetros de estados de superfície	610
10.10.1	Indicação do comprimento de avaliação, <i>ln</i>	610
10.10.1.1	Parâmetros de perfil (ISO 4287)	610
10.10.1.2	Parâmetros ligados aos motivos do perfil (ISO 12085)	611
10.10.1.3	Parâmetros baseados na curva da taxa do comprimento de sustentação (ISO 13565-2 e ISO 13565-3)	611
10.10.2	Indicação de limites de tolerância	611
10.10.3	Indicação da banda de transmissão e do comprimento de base	612
10.10.4	Tipos de tolerância – Unilateral e bilateral	614
10.11	Indicação do método de fabricação ou de informação correlacionada	614
10.12	Indicação das estrias de superfície	615
10.13	Indicação da sobre-espessura para trabalho mecânico	616
10.14	Indicações dos estados de superfície nos desenhos e noutra documentação técnica de produtos	617
10.15	Indicações mínimas para um controlo inequívoco de funções da superfície	619



10.15.1	Indicação de requisitos para um controlo inequívoco da taxa de comprimento de sustentação	622
10.15.2	Indicações para um controlo inequívoco das funções das superfícies avaliadas pelos métodos de medição tridimensionais (de superfície)	625
10.16	Critérios para a especificação de valores para os parâmetros de rugosidade	629
10.16.1	Algumas relações práticas entre parâmetros de rugosidade e as tolerâncias dimensionais	636
10.17	Símbolos de rugosidade utilizados em desenhos antigos	638
10.18	Regras de base para a determinação do valor do comprimento de onda de corte ( <i>"cut-off"</i> ) para a medição dos parâmetros do perfil de rugosidade	639
10.19	Regras e processos para a avaliação do estado de superfície pelo método do perfil (ISO 4288: 1996)	641
10.19.1	Procedimento simplificado para a verificação da rugosidade	641
10.19.2	Exame visual	642
10.19.3	Ensaio de medição	642
10.20	Relações entre parâmetros de perfil e parâmetros de superfície ( <i>"areal"</i> ) dos estados de superfície	643
10.20.1	Generalidades	643
10.20.2	Operação de filtragem	643
10.20.3	Outras considerações	644
10.21	Considerações finais	644
10.22	Referências	647
10.22.1	Normalização	650
<b>11</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>655</b>
11.1	Considerações finais	657
11.2	Síntese e conclusões extraídas do trabalho desenvolvido	658
11.3	Perspetivas para trabalho futuro	667



---

## Lista de siglas e abreviaturas

### Gerais

<b>ABC</b>	–	<i>America, Britain and Canada</i> (América, Grã-Bretanha e Canadá)
<b>ABNT</b>	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ADEM-ISEL</b>	–	Área Departamental de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
<b>AFM</b>	–	<i>Atomic Force Microscopy</i> (Microscopia de Força Atômica)
<b>AFNOR</b>	–	<i>Association Française de Normalisation</i> (Associação Francesa de Normalização)
<b>AIDMO</b>	–	<i>Arab Industrial Development and Mining Organization</i> (Organização Árabe para o Desenvolvimento Industrial e a Exploração Mineira)
<b>ANSI</b>	–	<i>American National Standards Institute</i> (Instituto Americano de Normalização)
<b>ARSO</b>	–	<i>African Regional Organization for Standardization</i> (Organização Regional Africana de Normalização)
<b>ASA</b>	–	<i>American Standards Association</i> (Associação Americana de Normalização)
<b>ASAC</b>	–	<i>Asian Standards Advisory Committee</i> (Comité Consultivo para a Normalização Asiática)
<b>ASME</b>	–	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)
<b>ASTM</b>	–	<i>American Society of Testing Materials</i> (Sociedade Americana de Ensaio de Materiais)
<b>BIPM</b>	–	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i> (Bureau Internacional de Pesos e Medidas)
<b>BSI</b>	–	<i>British Standards Institution</i> (Instituição Britânica de Normalização)
<b>CAD</b>	–	<i>Computer Aided Design</i> (Conceção Assistida por Computador)
<b>CADD</b>	–	<i>Computer Aided Design and Drafting</i> (Conceção e Desenho Assistidos por Computador)
<b>CAE</b>	–	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia Assistida por Computador)
<b>CAM</b>	–	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Fabricação Assistida por Computador)
<b>CAQ</b>	–	<i>Computer Aided Quality</i> (Qualidade Assistida por Computador)
<b>CD</b>	–	<i>Committee Draft</i> (Projeto de Comité)
<b>CEN</b>	–	<i>European Committee for Standardization</i> (Comité Europeu de Normalização)
<b>CENELEC</b>	–	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i> (Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica)
<b>CENFIM</b>	–	Centro de Formação Profissional da Indústria Metalúrgica e Metalomecânica
<b>CETIM</b>	–	<i>Centre Technique des Industries Mécaniques</i> (Centro Técnico das Indústrias Mecânicas)
<b>CFAC</b>	–	Conceção e Fabrico Assistidos por Computador
<b>CMM</b>	–	<i>Coordinate Measuring Machine</i> (Máquina de Medição de Coordenadas)

<b>CNOMO</b>	– <i>Comité de Normalisation des Moyens de Production</i> (Comité de Normalização dos Meios de Produção)
<b>COPANT</b>	– Comissão Pan-americana de Normas Técnicas
<b>CT</b>	– Comissão Técnica
<b>DCM</b>	– Desenho de Construção Mecânica
<b>DEMec</b>	– Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP
<b>DEMEGI</b>	– Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da FEUP
<b>DIN</b>	– <i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
<b>DIS</b>	– <i>Draft International Standard</i> (Projeto de Norma internacional)
<b>DMU</b>	– <i>Digital Mock-Up activities</i> (Atividades de modelação digital ou virtual)
<b>DT</b>	– Desenho Técnico
<b>EHD</b>	– Elastohidrodinâmico
<b>ETSI</b>	– <i>European Telecommunications Standards Institute</i> (Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações)
<b>EUR-ACE</b>	– <i>European Accreditation of Engineering Programmes</i> (Acreditação Europeia de Programas de Engenharia)
<b>FEUP</b>	– Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
<b>FDIS</b>	– <i>Final Draft International Standard</i> (Projeto final de Norma internacional)
<b>GD&amp;T</b>	– <i>Geometric Dimensioning &amp; Tolerancing</i> (Cotagem e Toleranciamento Geométrico)
<b>GPS</b>	– <i>Geometrical Product Specification</i> (Especificação Geométrica de Produtos)
<b>IANORQ</b>	– Instituto Angolano de Normalização e Qualidade
<b>ICS</b>	– <i>International Classification for Standards</i> (Classificação internacional para as normas)
<b>IEC</b>	– <i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
<b>IEP</b>	– Instituto Eletrotécnico Português
<b>INEGI</b>	– Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
<b>INNOQ</b>	– Instituto Nacional de Normalização e Qualidade (de Moçambique)
<b>IPAC</b>	– Instituto Português de Acreditação
<b>IPQ</b>	– Instituto Português da Qualidade
<b>ISA</b>	– <i>International Federation of the National Standardizing Associations</i> (Federação Internacional das Associações Nacionais de Normalização)
<b>ISO</b>	– <i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
<b>ISO/PAS</b>	– <i>ISO Publicly Available Specification</i> (Especificação disponível publicamente da ISO)
<b>ISO/R</b>	– <i>ISO Recommendation</i> (Recomendação ISO)
<b>ISO/TC</b>	– <i>ISO Technical Committee</i> (Comité técnico da ISO)
<b>ISO/TR</b>	– <i>ISO Technical Report</i> (Relatório técnico da ISO)
<b>ISO/TS</b>	– <i>ISO Technical Specification</i> (Especificação técnica da ISO)
<b>IWA</b>	– <i>International Workshop Agreement</i> (Acordo técnico IWA)
<b>LEM</b>	– Licenciatura em Engenharia Mecânica
<b>LLNL</b>	– <i>Lawrence Livermore National Laboratory</i> (na Califórnia)

<b>LNETI</b>	–	Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial
<b>MIEM</b>	–	Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
<b>MIL-STD</b>	–	<i>Military standard</i> (Norma militar americana)
<b>NIST</b>	–	<i>National Institute of Standards and Technology</i> (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia)
<b>NSOM/SNOM</b>	–	<i>Near-field Scanning Optical Microscopy</i> (Microscopia Ótica de Varrimento de Campo Próximo)
<b>ONN</b>	–	Organismo Nacional de Normalização
<b>ONS</b>	–	Organismo de Normalização Setorial
<b>PASC</b>	–	<i>Pacific Area Standards Congress</i> (Congresso de Normalização da Área do Pacífico)
<b>PDM</b>	–	<i>Product Data Management</i> (Gestão de Dados de Produtos)
<b>PME</b>	–	Pequenas e Médias Empresas
<b>PSA</b>	–	<i>Groupe Automobile PSA – Peugeot - Citroën</i>
<b>SC</b>	–	<i>Sub-committee</i> (Subcomité Técnico)
<b>SCM</b>	–	<i>Scanning Capacitance Microscopy</i> (Microscopia de Varrimento por Capacitância)
<b>SDI</b>	–	Secção de Desenho Industrial do DEMec
<b>SEM</b>	–	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (Microscopia Eletrónica de Varrimento)
<b>SMAP</b>	–	Secção de Mecânica Aplicada do DEMec
<b>SMPT</b>	–	Secção de Materiais e Processos Tecnológicos do DEMec
<b>SNV-VSM</b>	–	<i>Schweizerische Normen-Vereinigung – Verein Schweizerischer Maschinen-Industrieller</i> (Associação Suíça de Normalização – Sociedade Suíça de Construtores de Máquinas)
<b>SPM</b>	–	<i>Scanning Probe Microscopy</i> (Microscopia de Varrimento por Sonda)
<b>SPQ</b>	–	Sistema Português da Qualidade
<b>STM</b>	–	<i>Scanning Tunnelling Microscopy</i> (Microscopia de Varrimento por Efeito Túnel)
<b>TC</b>	–	<i>Technical Committee</i> (Comité Técnico)
<b>TPD</b>	–	<i>Technical Product Documentation</i> (Documentação Técnica de Produtos)
<b>TPS</b>	–	<i>Technical Product Specification</i> (Especificação Técnica de Produtos)
<b>UNSCC</b>	–	<i>United Nations Standards Coordinating Committee</i> (Comité de Coordenação de Normalização das Nações Unidas)
<b>UK</b>	–	<i>United Kingdom</i> (Reino Unido)
<b>UP</b>	–	Universidade do Porto
<b>URSS</b>	–	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
<b>USA</b>	–	<i>United States of America</i> (Estados Unidos da América)
<b>USASI</b>	–	<i>United States of America Standards Institute</i> (Instituto de Normalização dos Estados Unidos da América)
<b>VDE</b>	–	<i>Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik</i> (Associação de Eletrotécnica, Eletrónica e Tecnologias de Informação. Antiga Associação dos Engenheiros Eletrotécnicos Alemães)
<b>VDI</b>	–	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> (Associação dos Engenheiros Alemães)
<b>VD&amp;T</b>	–	<i>Vectorial Dimensioning &amp; Tolerancing</i> (Cotagem e Toleranciamento vetoriais)

## Da especificação geométrica de produtos

<b>APA</b>	–	<i>Any process allowed</i> (permitido qualquer processo de fabricação)
<b>DCT</b>	–	<i>Dimensional casting tolerance</i> (tolerância dimensional para peças fundidas)
<b>DCTG</b>	–	<i>Dimensional casting tolerancing grade</i> (grau de tolerância dimensional para peças fundidas)
<b>DOF</b>	–	<i>Degree of freedom</i> (grau de liberdade)
<b>DS</b>	–	<i>Datum system</i> (sistema de referências especificadas)
<b>GCT</b>	–	<i>Geometrical casting tolerance</i> (tolerância geométrica para peças fundidas)
<b>GCTG</b>	–	<i>Geometrical casting tolerancing grade</i> (grau de tolerância geométrica para peças fundidas)
<b>GDL</b>	–	Grau de liberdade ( <i>degree of freedom</i> )
<b>GDLR</b>	–	Grau de liberdade restringido ( <i>constrained degree of freedom</i> )
<b>IT</b>	–	<i>International Tolerance</i> (tolerância internacional)
<b>LLS</b>	–	<i>Lower limit of size</i> (limite inferior de tamanho)
<b>LMC</b>	–	<i>Least material condition</i> (condição de mínimo de matéria)
<b>LMR</b>	–	<i>Least material requirement</i> (requisito de mínimo de matéria)
<b>LMS</b>	–	<i>Least material size</i> (tamanho de mínimo de matéria)
<b>LMVC</b>	–	<i>Least material virtual condition</i> (condição virtual de mínimo de matéria)
<b>LMVS</b>	–	<i>Least material virtual size</i> (tamanho virtual de mínimo de matéria)
<b>LSL</b>	–	<i>Lower specification limit</i> (limite inferior da especificação)
<b>MMC</b>	–	<i>Maximum material condition</i> (condição de máximo de matéria)
<b>MMR</b>	–	<i>Maximum material requirement</i> (requisito de máximo de matéria)
<b>MRR</b>	–	<i>Material removal required</i> (obrigatoriedade de remoção de matéria)
<b>MMS</b>	–	<i>Maximum material size</i> (tamanho de máximo de matéria)
<b>MMVC</b>	–	<i>Maximum material virtual condition</i> (condição virtual de máximo de matéria)
<b>MMVS</b>	–	<i>Maximum material virtual size</i> (tamanho virtual de máximo de matéria)
<b>NI</b>	–	Índice de imbricação ( <i>nesting index</i> )
<b>NMR</b>	–	<i>No material removed</i> (interdição de remoção de matéria)
<b>RPR</b>	–	<i>Reciprocity requirement</i> (requisito de reciprocidade)
<b>RMA</b>	–	<i>Required machining allowance</i> (sobre-espessura requerida para trabalho mecânico)
<b>RMAG</b>	–	<i>Required machining allowance grade</i> (grau de sobre-espessura requerida para trabalho mecânico)
<b>R.M.S.</b>	–	<i>Root Mean Square deviation (of roughness)</i>
<b>SMI</b>	–	<i>Surface mismatch</i> (desencontro da superfície de apartação ou de junta)
<b>TED</b>	–	<i>Theoretically exact dimension</i> (dimensão teoricamente exata)
<b>TEF</b>	–	<i>Theoretically exact feature</i> (elemento teoricamente exato)
<b>TG</b>	–	<i>Tolerance group</i> (grupo de tolerância) (DIN 16742)

<b>ULS</b>	–	<i>Upper limit of size</i> (limite superior de tamanho)
<b>UPR</b>	–	<i>Undulations per revolution</i> (ondulações por rotação)
<b>USL</b>	–	<i>Upper specification limit</i> (limite superior da especificação)





---

## Lista de símbolos

$c$	–	Nível de corte [ $\mu\text{m}$ ]
$d$	–	Tamanho de elemento exterior (veio) [mm]
$d_c$	–	Dimensão nominal de peça em bruto de fundição [mm]
$d_M$	–	Dimensão nominal de peça fundida após trabalho mecânico [mm]
$d_{M\max}$	–	Dimensão máxima da peça fundida após trabalho mecânico [mm]
$d_{M\min}$	–	Dimensão mínima da peça fundida após trabalho mecânico [mm]
$ei$	–	Desvio limite inferior para veio [ $\mu\text{m}$ , mm]
$es$	–	Desvio limite superior para veio [ $\mu\text{m}$ , mm]
$h_0$	–	Espessura do filme lubrificante no centro do contacto [ $\mu\text{m}$ ]
$h_{0c}$	–	Espessura corrigida do filme lubrificante no centro do contacto [ $\mu\text{m}$ ]
$i$	–	Fator de tolerância (ISO 286-1) [ $\mu\text{m}$ ]
$l_{LMS}$	–	Tamanho de mínimo de matéria [mm]
$l_{LMVS}$	–	Tamanho virtual de mínimo de matéria [mm]
$l_{MMS}$	–	Tamanho de máximo de matéria [mm]
$l_{MMVS}$	–	Tamanho virtual de máximo de matéria [mm]
$l_{MS}$	–	Tamanho de montagem ( <i>mating size</i> ) [mm]
$l_n$	–	Comprimento de avaliação ( <i>evaluation length</i> ) [mm]
$l_r$	–	Comprimento de base ( <i>sampling length</i> ) [mm]
$t_D$	–	Valor de tolerância dimensional [mm]
$t_{DCT}$	–	Valor de tolerância dimensional de fundição [mm]
$t_{DMT}$	–	Valor de tolerância dimensional de trabalho mecânico [mm]
$t_{FCT}$	–	Valor de tolerância geométrica de forma de fundição [mm]
$t_{FLAC}$	–	Valor de tolerância geométrica de planeza da peça em bruto de fundição [mm]
$t_{FMT}$	–	Valor de tolerância geométrica de forma de trabalho mecânico [mm]
$t_G$	–	Valor de tolerância geométrica [mm]
$t_{GCT}$	–	Valor de tolerância geométrica de fundição [mm]
$t_{PARC}$	–	Valor da tolerância geométrica de paralelismo da peça em bruto de fundição [mm]
$t_{PARM}$	–	Valor da tolerância geométrica de paralelismo de trabalho mecânico [mm]
$A$	–	Área limitada pela linha integral extraída de uma secção reta [ $\text{mm}^2$ ]
$A_{\max.}$	–	Aperto máximo [ $\mu\text{m}$ ]
$A_{\text{med.}}$	–	Aperto médio [ $\mu\text{m}$ ]
$A_{\min.}$	–	Aperto mínimo [ $\mu\text{m}$ ]

<b><math>A_{RMA}</math></b>	– Valor de sobre-espessura para trabalho mecânico de peça fundida [mm]
<b>ACS</b>	– Secção reta qualquer ( <i>any cross section</i> )
<b><math>AR_i</math></b>	– Comprimentos dos motivos de rugosidade (ISO 12085) [mm]
<b>C</b>	– Comprimento de linha integral extraída numa secção reta [mm]
<b>CZ</b>	– Zona combinada ( <i>combined zone</i> )
<b>D</b>	– Tamanho de elemento interior (furo) [mm]
<b><math>D_n</math></b>	– Tamanho nominal [mm]
<b><math>D_p</math></b>	– Distância extrema do elemento toleranciado à origem do sistema de referências (ISO 16742) [mm]
<b>El</b>	– Desvio limite inferior para furo [ $\mu\text{m}$ , mm]
<b><math>Ei_i</math></b>	– Elemento geométrico ideal
<b><math>En_i</math></b>	– Elemento geométrico não ideal (real)
<b>ES</b>	– Desvio limite superior para furo [ $\mu\text{m}$ , mm]
<b><math>F_{\text{max.}}</math></b>	– Folga máxima [ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>F_{\text{med.}}</math></b>	– Folga média [ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>F_{\text{min.}}</math></b>	– Folga mínima [ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>H_j</math></b>	– Profundidades dos motivos de rugosidade (ISO 12085) [mm]
<b>I</b>	– Fator de tolerância (ISO 286-1) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>IT</b>	– <i>International Tolerance</i> (tolerância internacional)
<b>L</b>	– Limite inferior de tolerância unilateral ( <i>unilateral lower tolerance limit</i> ) (ISO 1302)
<b>LD</b>	– Diâmetro menor ( <i>minor diameter</i> )
<b>MD</b>	– Diâmetro maior ( <i>major diameter</i> )
<b>MI(c)</b>	– Comprimento de sustentação do perfil de rugosidade [mm]
<b>NCS</b>	– Número de características de situação
<b>NID</b>	– Número de graus de invariância ( <i>number of invariance degrees</i> )
<b>OZ</b>	– Zona de deslocamento ( <i>offset zone</i> )
<b>P</b>	– Parâmetros estruturais do perfil primário [ $\mu\text{m}$ ]
<b>PD</b>	– Diâmetro nos flancos ou diâmetro primitivo ( <i>pitch diameter</i> )
<b>R</b>	– Parâmetros do perfil de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
<b>R</b>	– Profundidade média dos motivos de rugosidade (ISO 12085) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Ra</b>	– Desvio médio aritmético do perfil de rugosidade ( <i>arithmetical mean deviation of the roughness profile</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>R&amp;c</b>	– Diferença de alturas de corte do perfil de rugosidade ( <i>roughness profile section height difference</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Rk</b>	– Profundidade do perfil reduzido (ISO 13565-2) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Rmax</b>	– Altura máxima do perfil de rugosidade ( <i>maximum peak-to-valley height of the roughness profile</i> ) (DIN 4768) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Rmr</b>	– Taxa do comprimento de sustentação relativa do perfil de rugosidade ( <i>relative material ratio of the roughness profile</i> ) [%]

<b>Rmr(c)</b>	– Taxa do comprimento de sustentação do perfil de rugosidade ( <i>material ratio of the roughness profile</i> ) [%]
<b>R.M.S.</b>	– Root Mean Square deviation (of the roughness profile) [μm]
<b>Rp</b>	– Altura máxima de pico de perfil ( <i>maximum profile peak height</i> ) [μm]
<b>Rpk</b>	– Altura dos picos eliminados (ISO 13565-2) [μm]
<b>Rq</b>	– Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade ( <i>root mean square deviation of the roughness profile</i> ) [μm]
<b>RSm</b>	– Largura média dos elementos do perfil de rugosidade ( <i>mean width of the roughness profile elements</i> ) [mm]
<b>Rt</b>	– Altura total do perfil de rugosidade ( <i>total height of the roughness profile</i> ) [μm]
<b>Rvk</b>	– Profundidade dos vales eliminados (ISO 13565-2) [μm]
<b>Rz</b>	– Altura das irregularidades sobre 10 pontos do perfil de rugosidade ( <i>ten point height of irregularities of roughness profile</i> ) (ISO 468) [μm]
<b>Rz</b>	– Altura máxima do perfil de rugosidade ( <i>maximum height of roughness profile</i> ) (ISO 4287) [μm]
<b>Rz</b>	– Média das alturas máximas do perfil de rugosidade ( <i>arithmetical mean value of peak-to-valley height of the roughness profile</i> ) (DIN 4768) [μm]
<b>S</b>	– Área de contacto real [mm <sup>2</sup> ]
<b>S<sub>H</sub></b>	– Área de contacto aparente [mm <sup>2</sup> ]
<b>Sa</b>	– Altura média aritmética numa área de definição ( <i>arithmetical mean height</i> ) (ISO 25176-2) [μm, por omissão]
<b>SIMi</b>	– Requisito simultâneo nº <i>i</i>
<b>Smr(c)</b>	– Taxa da superfície de sustentação da superfície à escala limitada ( <i>areal material ratio of the scale-limited surface</i> ) (ISO 25176-2) [%]
<b>Sp</b>	– Altura máxima de pico ( <i>maximum peak height</i> ) (ISO 25176-2) [μm, por omissão]
<b>Sq</b>	– Altura média quadrática da superfície à escala limitada ( <i>root mean square height of the scale-limited surface</i> ) (ISO 25176-2) [μm, por omissão]
<b>Str</b>	– Fator de forma do estado de superfície ( <i>texture aspect ratio</i> ) (ISO 25176-2) [–]
<b>Sv</b>	– Profundidade máxima da cavidade ( <i>maximum pit height</i> ) (ISO 25176-2) [μm, por omissão]
<b>Sz</b>	– Altura máxima da superfície à escala limitada ( <i>maximum height of scale-limited surface</i> ) (ISO 25176-2) [μm, por omissão]
<b>SZ</b>	– Zonas separadas ( <i>separate zones</i> )
<b>T</b>	– Tolerância
<b>T<sub>aj</sub></b>	– Amplitude (ou tolerância) de um ajustamento ( <i>span of a fit</i> ) [μm]
<b>T<sub>D</sub></b>	– Tolerância dimensional [μm, mm]
<b>T<sub>α</sub></b>	– Tolerância angular [°]
<b>U</b>	– Incerteza de medição expandida
<b>U</b>	– Limite superior de tolerância unilateral ( <i>unilateral upper tolerance limit</i> ) (ISO 1302)
<b>UF</b>	– Elemento unificado ( <i>united feature</i> )
<b>UZ</b>	– Zona assimétrica ( <i>unequally disposed tolerance zone</i> )
<b>V</b>	– Volume limitado pelo cilindro integral extraído [mm <sup>3</sup> ]

<b>VA</b>	– Ângulo variável ( <i>variable angle</i> )
<b>W</b>	– Parâmetros do perfil de ondulação [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Wa</b>	– Desvio médio aritmético do perfil de ondulação ( <i>arithmetical mean deviation of the waviness profile</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>W<math>\delta</math>c</b>	– Diferença de alturas de corte do perfil de ondulação ( <i>waviness profile section height difference</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Wmr</b>	– Taxa do comprimento de sustentação relativa do perfil de ondulação ( <i>relative material ratio of the waviness profile</i> ) [%]
<b>Wmr(c)</b>	– Taxa do comprimento de sustentação do perfil de ondulação ( <i>material ratio of the waviness profile</i> ) [%]
<b>Wz</b>	– Altura máxima do perfil de ondulação ( <i>maximum height of waviness profile</i> ) (ISO 4287) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Xs<sub>i</sub></b>	– Larguras dos elementos do perfil de rugosidade ( <i>widths of the roughness profile elements</i> ) [mm]
<b>Z<sub>i</sub></b>	– Alturas máximas do perfil ( <i>peak-to-valley height</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Zp</b>	– Altura de pico do perfil ( <i>profile peak height</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Z(x)</b>	– Ordenadas no interior de um comprimento de base [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Zt</b>	– Altura de elemento do perfil ( <i>profile element height</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Zv</b>	– Profundidade de vale do perfil ( <i>profile valley depth</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>\alpha</math></b>	– Ângulo de um cone [°]
<b><math>\beta</math></b>	– Ângulo de uma cunha [°]
<b><math>\beta_c</math></b>	– Raio de curvatura médio dos picos de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>\Delta_\alpha</math></b>	– Desvio angular [°]
<b><math>\lambda</math></b>	– Comprimento de onda ( <i>wavelength</i> ) [mm, $\mu\text{m}$ ]
<b><math>\lambda_c</math></b>	– Comprimento de onda de corte ( <i>cut-off wavelength</i> ) que define a separação entre os componentes de rugosidade e de ondulação [mm]
<b><math>\lambda_f</math></b>	– Comprimento de onda de corte do filtro de perfil que define a separação entre os componentes de ondulação e de componentes de onda ainda mais longos [mm]
<b><math>\lambda_s</math></b>	– Comprimento de onda de corte do filtro de perfil que define a separação entre os componentes de rugosidade e de componentes de onda ainda mais curtos [ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>\Lambda</math></b>	– Espessura específica do filme lubrificante [–]
<b><math>\sigma</math></b>	– Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade ( <i>root mean square deviation of the roughness profile</i> ) [ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>\sigma_c</math></b>	– Desvio quadrático composto de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>\sigma_i</math></b>	– Desvios médios quadráticos dos perfis de cada uma das superfícies <i>i</i> em contacto [ $\mu\text{m}$ ]

# **CAPÍTULO 1**

## **Introdução**



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações gerais

No atual processo geral de globalização da economia mundial, a indústria dos países desenvolvidos tem demonstrado uma tendência crescente para concentrar as suas atividades nas fases de concepção e montagem de produtos, contratando no exterior a fabricação dos respectivos componentes, numa estratégia de obtenção de custos de produção mais baixos.

Por outro lado, com o aumento do número de empresas que dependem, cada vez mais, de tecnologia baseada em sistemas computadorizados, para poderem dar resposta às necessidades crescentes de produção de peças mais sofisticadas e a preços mais reduzidos, ficaram mais condicionadas as oportunidades de interação humana com os **desenhos de engenharia**, no âmbito dos diferentes processos de fabricação.

Uma consequência destas duas tendências, que se vêm desenvolvendo em paralelo, foi a demonstração das limitações de alguns dos processos de especificação tradicionais, tornando-se clara a necessidade urgente de aumentar o grau de detalhe e exatidão na **especificação de requisitos** para a fabricação de produtos técnicos. Esta intenção prende-se com uma exigência de redução das ambiguidades e da possibilidade de serem feitas interpretações subjetivas, nos estádios de fabricação e de verificação.

Para se alcançar esse objetivo, é preciso que o conhecimento relevante possa ser modelado através da utilização de um método mais exato para traduzir os requisitos funcionais das peças, que as especificações utilizadas sejam completas e bem definidas e que as estratégias de verificação aplicadas sejam integradas, de modo a facilitar a sua inclusão em **sistemas 3D de CAD/CAM/CAQ (CMM)** (*"Computer aided design"/"Computer aided manufacturing"/"Computer aided quality (coordinate measuring machines)"*), ver figura 1.1.

Nesta tomada de consciência, teve grande importância o alerta lançado, em 1988, nos USA, relativo à existência de problemas derivados da utilização de máquinas de medição de coordenadas (CMMs) na verificação da conformidade dimensional de peças mecânicas, que trouxe ao conhecimento público aquilo que ficou conhecido por *"metrology crisis"* [F1, V1].

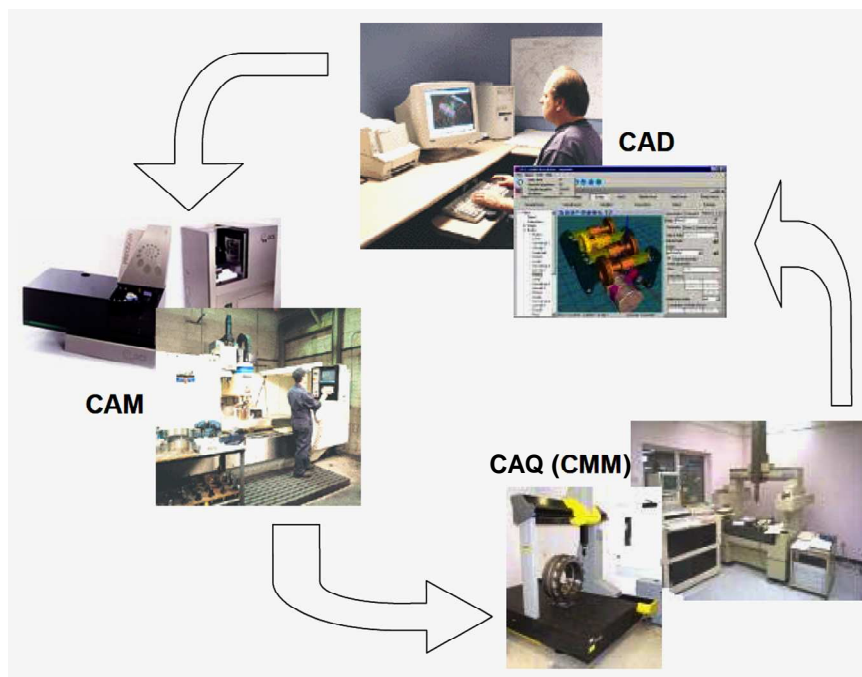


Figura 1.1 – O sistema de CAD/CAM/CAQ (CMM) funcionando em ciclo fechado para assegurar a garantia da qualidade na produção [H1]

As divergências registradas nos métodos residentes nas CMMs, devidas a problemas de *software*, levavam a que se cometessem erros relativos, na aceitação de peças defeituosas ou na rejeição de peças boas, que chegavam a atingir os 50 %. Vários fatores que ocorriam ao mesmo tempo estavam na origem desta situação [F1]:

- interpretações contraditórias das normas, por parte de projetistas e metrologistas intervenientes na verificação de peças que, com frequência, não entendiam corretamente princípios de base da cotagem e do toleranciamento geométrico;
- falta de práticas de medição normalizadas, uma vez que técnicas de medição diversas produziam resultados de verificação diferentes;
- problemas de desempenho do *software* instalado nas CMMs devidos, quer aos defeitos nele incorporados, quer às limitações dos algoritmos de análise de dados pós-verificação.

Neste enquadramento, a Organização Internacional de Normalização (ISO) está a desenvolver novos conceitos no domínio da **Especificação técnica de produtos** – conjunto de documentos técnicos que inclui a definição de conceção e a especificação completas de um produto, para fins de fabricação e verificação – com base nas normas internacionais em vigor e em elaboração. Uma **TPS** (*“Technical product specification”*) poderá consistir num ou mais documentos técnicos de produtos e englobar **desenhos, modelos 3D, listas de peças** ou outros documentos que sejam parte integrante da especificação, qualquer que seja o formato em que se apresentem (ver o relatório técnico ISO/TR 23605 e a referência [A1]).



Os requisitos para a normalização no âmbito da especificação técnica, em todas as fases (ou estádios), desde a preparação dos conceitos de conceção para a concretização física, até à validação dos produtos acabados, baseiam-se, atualmente, em dois grandes conceitos desenvolvidos pela ISO: a Documentação técnica de produtos e a Especificação geométrica de produtos.

A **Documentação técnica de produtos** é o conjunto de meios de comunicação da totalidade ou de parte de uma definição de conceção ou especificação de um produto, para fins de fabricação e verificação. A **TPD** (*“Technical product documentation”*), que inclui os desenhos técnicos preparados por meio de traçado manual ou através de sistemas de CAD, é o domínio de trabalho do Comité técnico **ISO/TC 10**, englobando regras de desenho e de documentação; gestão de informação técnica de produtos; modelação de produtos; classificação de documentos, sistemas, etc.; terminologia; simbologia e suportes e equipamento para desenhos, destinado a facilitar a preparação, gestão, armazenamento, recuperação, reprodução, permuta e utilização de documentos que cobrem as necessidades técnicas existentes ao longo do ciclo de vida dos produtos [B3].

A **Especificação geométrica de produtos** é um sistema internacionalmente aceite (ISO 14638) que é utilizado para descrever certas características das peças, durante alguns dos diferentes estádios do seu ciclo de vida (conceção, fabricação, inspeção, etc.). Presentemente, neste sistema, estão identificados os seguintes nove tipos de propriedades geométricas: tamanho, distância, forma, orientação, posição, batimento, estado de superfície (métodos do perfil), estado de superfície (métodos da superfície) e imperfeições de superfície. Alguns processos de fabricação e órgãos de máquinas particulares apresentam requisitos específicos que levam a que as correspondentes normas sejam agrupadas em cadeias de normas adicionais. Provavelmente, no futuro, poderão vir a ser incluídas propriedades geométricas suplementares, de modo a refletir a evolução verificada nos processos de fabricação e de inspeção e noutros requisitos industriais. Este conceito pode ser expresso, de um modo mais simples, como o conjunto de requisitos que especificam a macro e a microgeometria de um produto (peça), associado com requisitos para a verificação e a calibração dos respetivos instrumentos de medição [B4].

A **GPS** (*“Geometrical product specification”*) é o domínio de trabalho do Comité técnico **ISO/TC 213**, cujo objetivo principal é o desenvolvimento e a promoção de um sistema integrado para a especificação e verificação da geometria das peças, que possa funcionar como uma ferramenta importante de engenharia no desenvolvimento e fabricação de produtos.

Antigamente, a maioria das empresas tinha os seus serviços de conceção e de fabricação sediados no mesmo local. Esse facto facilitava um nível de entendimento elevado entre o projetista, a oficina e os metrologistas. Num tal ambiente, as insuficiências dos desenhos técnicos, da fabricação, dos procedimentos de medição e das normas afins não eram críticas para o sucesso da produção. Hoje em dia, isso só continua a ser verdade onde tais ambientes produtivos ainda subsistem.

No entanto, agora que o “*outsourcing*” (contratação externa) de tarefas produtivas está a tornar-se cada vez mais comum, aquele grau de entendimento mútuo não pode estar sempre presente, obrigando, assim, a que a documentação técnica elaborada tenha que ser mais rigorosa.

Para as empresas com os seus serviços de conceção e fabricação no mesmo local, as velhas ferramentas de cotagem e toleranciamento poderão ainda ser válidas, mas não serão, necessariamente, as ótimas para todas as novas conceções. As novas necessidades requerem mais flexibilidade nas normas que devem disponibilizar uma ampla variedade de ferramentas de cotagem e toleranciamento. Consequentemente, a normalização no âmbito da Especificação Geométrica de Produtos (GPS) está a sofrer uma evolução orientada para uma base mais matemática e científica, de modo a permitir uma melhor interface das funções de produção com o conhecimento científico.

A **Geometria** (características geométricas, propriedades geométricas) deve ser entendida num sentido lato, cobrindo:

- a) a expressão de requisitos funcionais de uma peça, em termos de descrições geométricas, incluindo o tamanho (p. ex. diâmetros), distâncias, ângulos, estado de superfície, forma, orientação, posição, etc.;
- b) a limitação dos desvios admissíveis dessa geometria, para fins da produção.

Por outro lado, é reconhecido que, atualmente, na “Especificação e Verificação Geométricas de Produtos”, coexistem dois sistemas de metrologia (figura 1.2):

- 1) a metrologia convencional, baseada em instrumentos de medição (“*hard gauging*”) (planos de controlo, comparadores, etc.);
- 2) a metrologia digital computadorizada, baseada em pontos de amostragem e na análise através de *software* de computador [máquinas de medição de coordenadas (CMMs – “*Coordinate measuring machines*”), etc.].

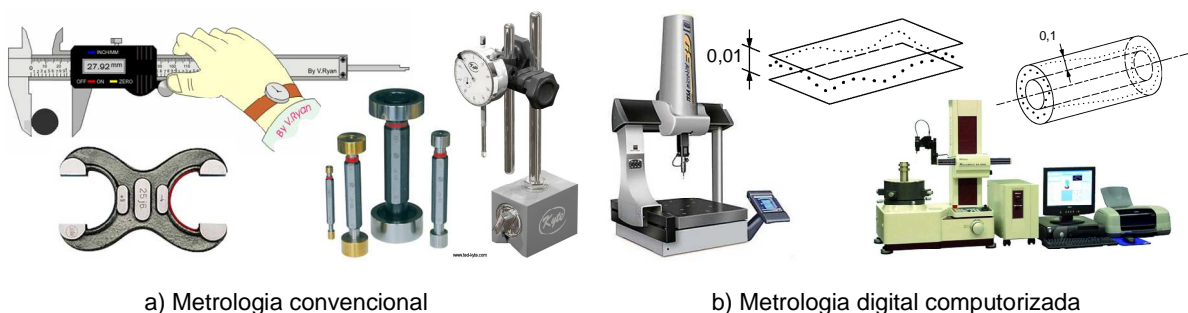


Figura 1.2 – Sistemas de metrologia para a verificação geométrica de produtos

A inclusão do cálculo digital ampliou o âmbito da metrologia convencional e tornou-a mais flexível, uma vez que, com a utilização de computadores, praticamente toda a **mensuranda** (grandeza particular submetida à medição) perceptível pode agora ser calculada. Logo, o desafio atual é

desenvolver a matematização das mensurandas convencionais, de modo a que elas possam ser aplicáveis em ambos os sistemas.

Presentemente, as diferentes atividades produtivas desenvolvem-se pois num mercado global em que [B3 e B4]:

- as **especificações técnicas de produtos**, ao nível da conceção, para fins de fabricação e de verificação, são de grande importância, em todos os setores de atividade;
- há uma necessidade de compreensão, comunicação e aplicação das **Normas**, ao nível do mercado global, com vista à eliminação das barreiras técnicas;
- a utilização de **sistemas de CAD, CAM, PDM** (*“Product data management”*), etc. é predominante;
- uma **Metrologia** de utilização cada vez mais sofisticada é aplicada na verificação de requisitos de peças funcionalmente relevantes (p. ex. a metrologia digital computadorizada, baseada em máquinas de medição de coordenadas), ampliando o âmbito da metrologia convencional, baseada em instrumentos de medição;
- a utilização de **“outsourcing”** (contratação externa), **subcontratação e consultoria** está em crescimento;
- a implementação de **Sistemas de gestão da qualidade**, em conformidade com as normas da série ISO 9000, é prioritária para todas as indústrias;
- a **documentação técnica de produtos** (nela incluindo os **desenhos técnicos**) serve de base para a interpretação de contratos e a **documentação GPS** pode ser vista como a base de um contrato firme;
- há uma exigência crescente de peças com funções altamente sofisticadas, a preços cada vez mais competitivos.

Segundo o Comité técnico **ISO/TC 213** – *“Dimensional and geometrical product specifications and verification”*, dados empíricos mostram que quase 80 % dos custos de um produto derivam de decisões tomadas durante as fases de conceção e de produção inicial desse produto. Acresce a isso que os custos médios resultantes das ambiguidades existentes nos desenhos de engenharia podem atingir cerca de 20 % do volume de negócios da produção. Logo, definições incorretas e ambíguas dos requisitos GPS são fatores de elevado risco económico para a indústria e estão na base de muitos litígios entre empresas [B1, B4, B2].

Num tal mercado, o **Sistema de especificação técnica de produtos** em desenvolvimento, com o objetivo de facilitar a sua integração em **sistemas 3D de CAD/CAM/CAQ**, tornou-se no único meio estável de comunicação técnica no âmbito do **processo de desenvolvimento de produtos**.

Logo, existe uma necessidade clara de melhorar a comunicação técnica entre o projetista e a oficina, de modo a evitar que se continuem a registar as seguintes situações:

- frequentemente, acaba por não ser o projetista que decide sobre a função final da peça;
- muitas vezes, é o pessoal da medição e controlo que, involuntariamente, estabelece as características funcionais da peça, através de uma escolha aleatória dos métodos e equipamento de medição, ou a função é decidida através do software integrado no equipamento de medição;
- onde reina o acaso, a qualidade não pode ser controlada;
- as entidades subcontratadas sofrem prejuízos.

Para obviar a isto, vários elementos de comunicação podem e devem ser aperfeiçoados:

- 1) O entendimento e conhecimento humano da linguagem simbólica utilizada no desenho, que expressa as características funcionais necessárias à peça, através de tolerâncias geométricas e outras.
- 2) Os desenhos devem ser elaborados de um modo mais preciso e único, ou seja, devem especificar todos os requisitos que são essenciais para as funções da peça.
- 3) É necessária uma “linguagem” normalizada, sistemática, completa e altamente desenvolvida, para expressar e traduzir a função da peça em requisitos geométricos no desenho.

Neste contexto, o ISO/TC 213 está a desenvolver uma nova geração da linguagem GPS, na qual o sistema GPS integrado, para a especificação e a verificação da geometria de uma peça, será uma ferramenta de engenharia aperfeiçoada para o desenvolvimento e o fabrico de produtos. O objectivo deste sistema aperfeiçoado é disponibilizar ferramentas para uma gestão económica da variabilidade de produtos e processos.

As tolerâncias são uma parte essencial da conceção e da fabricação, estando omnipresentes em várias fases (ou estádios) do ciclo de vida de um produto. A figura 1.3 descreve os fluxos de informação e dos objetos físicos, relacionados com as tolerâncias, ao longo de uma série de fases de um ciclo de vida.

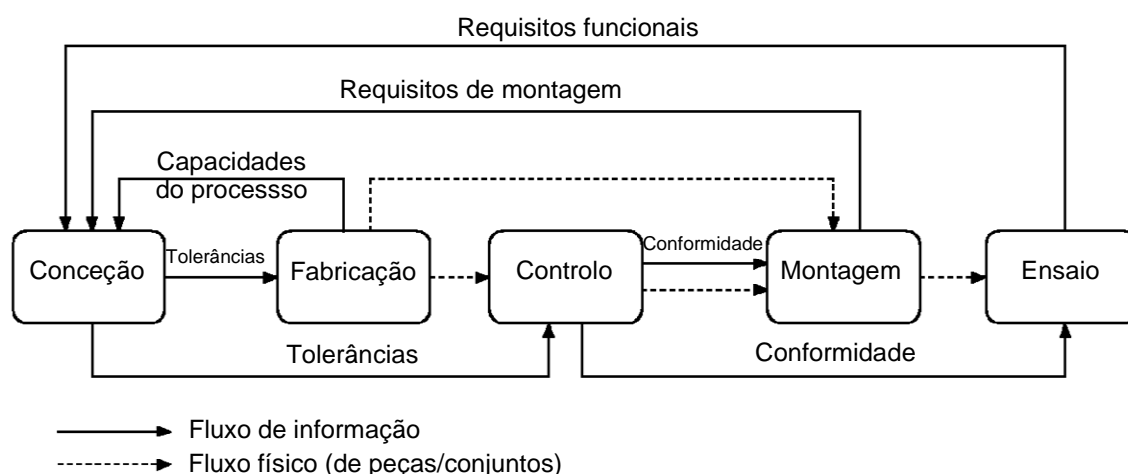


Figura 1.3 – O papel omnipresente das tolerâncias no ciclo de vida de um produto. Adaptada de [H2]

Uma vez que o papel das tolerâncias, ao longo de um ciclo de vida, varia de fase para fase, dependendo dos seus próprios objetivos, não é fácil ter em conta todos os diferentes fatores quando o projetista estabelece uma dada tolerância. Na conceção, a funcionalidade é o motivo de preocupação, pelo que, idealmente, as tolerâncias deverão ser tão próximas de zero quanto possível. No entanto, a fabricação coloca restrições a esse ideal. Logo as decisões de especificação geométrica (toleranciamentos) deverão respeitar as capacidades limitadas dos processos de fabricação requeridos, bem como a funcionalidade e/ou as restrições de montagem [H2].

A onipresença das tolerâncias liga os vários problemas com elas relacionados, nas diferentes fases do ciclo de vida, caracterizados por seus próprios objetivos e pontos de vista. Estes problemas individuais estão interligados entre si, o que faz com que a tarefa da especificação geométrica seja muito exigente para ser levada a cabo de modo eficaz.

## **1.2 Motivação e objetivos**

O contacto, ao longo das últimas décadas, com um número significativo de profissionais de diferentes setores da indústria nacional, no âmbito de ações de formação contínua, permitiu registar bastantes lacunas no acesso a informação atualizada no domínio da “Especificação técnica de produtos”.

De acordo com Srinivasan [S1], nos próximos anos, vão ocorrer grandes desenvolvimentos ao nível das normas ISO sobre toleranciamentos, alicerçados em progressos científicos e com a subsequente codificação de conceitos e de terminologia. A indústria debater-se-á com a magnitude de tais alterações e haverá uma grande necessidade de formação da mão-de-obra industrial e dos estudantes das escolas superiores, nestes domínios, prevendo-se que este processo se estenda pelas próximas duas décadas.

A elaboração deste trabalho resultou da perceção de que, a nível nacional, ainda não existia um documento atualizado de síntese neste domínio, que permitisse apoiar a generalidade das pequenas e médias empresas nacionais, que produzem produtos transacionáveis de elevado valor acrescentado, para o mercado global, e que se envolvem muitas vezes em litígios com os seus clientes e fornecedores, sobre os resultados da verificação da conformidade ou da não conformidade dos produtos, derivados de especificações ambíguas existentes na documentação técnica.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

Este documento está dividido em onze capítulos organizados do seguinte modo:

Neste capítulo, faz-se uma contextualização do trabalho realizado, referem-se as motivações que lhe deram origem e apresentam-se os seus principais objetivos.

No capítulo 2, principia-se por mostrar a importância do conceito de Normalização para as mais diferentes atividades humanas correntes e sobretudo para as de índole económica. Refere-se também a importância da promoção da sua difusão pelos diversos setores económicos nacionais, nomeadamente na perspetiva do Mercado Interno Europeu, destacando-se o trabalho que vem sendo desenvolvido, nesse sentido, pelo INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, nos domínios do “Desenho técnico” e dos “Elementos de ligação mecânicos”. Finalmente, assinala-se o papel fundamental do conceito de “dimensões nominais preferenciais” na estruturação da normalização em diferentes domínios, nomeadamente ao nível da “Especificação técnica de produtos” e apresentam-se alguns dos principais objetivos da Normalização internacional para o século XXI.

No capítulo 3, muito centrado na “Documentação técnica de produtos”, começa-se por oferecer uma visão geral sobre a evolução da representação gráfica em engenharia. Em seguida, expõem-se as bases para a definição do modelo internacional, proposto pela ISO, com vista ao estabelecimento dos requisitos para a preparação de todas as formas de especificação técnica de produtos e apresentam-se alguns exemplos de aplicação de conceitos de Documentação técnica nas diferentes atividades do processo de desenvolvimento de produtos. Por fim, destaca-se o papel desempenhado pela Secção de Desenho Industrial do DEMec, ao longo dos últimos quarenta anos, na introdução e desenvolvimento dos novos conceitos, no âmbito da “Especificação técnica de produtos”, ao nível do Ensino universitário nacional e na sua promoção e divulgação a nível industrial.

No capítulo 4, expõem-se os fundamentos da nova linguagem ISO de especificação geométrica de produtos (GPS). Começa-se por apresentar o conceito GPS. Assinala-se o papel relevante desempenhado pelos elementos geométricos de superfície na especificação de produtos e refere-se o interesse da sua classificação, desenvolvida a partir da noção de simetria. Mostra-se que os seus correspondentes elementos de situação são determinantes no estabelecimento de referências especificadas (“*datums*”), necessárias para a definição da posição e/ou da orientação de zonas de tolerância ou de condições virtuais, em termos de toleranciamento geométrico, e na instituição de uma base racional para a parametrização da situação relativa entre elementos geométricos, por meio de características (intrínsecas e de situação) e de restrições geométricas, nomeadamente entre os elementos de referência e os elementos toleranciados. Introduzem-se os conceitos de “modelo da superfície não ideal” (“*skin model*”) e de “operações para elementos”, que desempenham um papel central no novo sistema GPS. Faz-se uma breve referência a dois métodos de especificação geométrica, estabelecidos pela ISO, com vista a assegurar uma melhor integração da nova linguagem GPS em sistemas 3D de CAD/CAM/CAQ. Finalmente assinala-se, também, a importância atribuída ao conceito de incerteza, por via da sua generalização pelas diferentes fases do processo de desenvolvimento de produtos, o que permitirá uma melhor avaliação do grau de correlação entre a especificação e os requisitos funcionais, das ambiguidades que existem na própria especificação e da incerteza da medição.

No capítulo 5, principia-se por chamar à atenção para a nova centralidade que o princípio de independência (ISO 8015) adquiriu, na nova linguagem ISO de especificação geométrica, em termos da definição do relacionamento entre as especificações dimensionais e geométricas, inscritas nos desenhos técnicos e documentos técnicos afins. Seguidamente, faz-se referência aos treze princípios fundamentais que estão na base da criação, interpretação e aplicação de todos os documentos normativos, no domínio da especificação geométrica de produtos (GPS). Por fim, abordam-se as regras para a indicação de especificações GPS gerais, por omissão, utilizadas para simplificar o toleranciamento nos desenhos técnicos, e regras para a indicação de especificações GPS especiais, através do acrescento de requisitos complementares às especificações ISO de base, com vista a modificar as operações definidas por omissão.

No capítulo 6, abordam-se alguns dos temas fundamentais relativos ao toleranciamento de dimensões, começando por uma referência histórica ao processo que motivou o seu desenvolvimento. Em seguida apresentam-se os conceitos de base sobre o atual toleranciamento dimensional, em desenhos de engenharia mecânica, e desenvolve-se o conceito de “elemento de tamanho” a partir do qual é definida a dimensão “tamanho”. Apresentam-se os diferentes tipos de “tamanhos lineares”, atualmente postos ao dispor dos projetistas, e faz-se uma apresentação resumida do atual “Sistema ISO de tolerâncias e de ajustamentos”. Por fim, referem-se os trabalhos, ainda em fase de desenvolvimento, relativos aos “tamanhos angulares” e mostram-se exemplos das limitações deste tipo de toleranciamento em dimensões que não sejam tamanhos.

No capítulo 7, tratam-se alguns dos temas fundamentais relativos ao toleranciamento geométrico, começando por uma referência ao processo histórico que desencadeou o seu aparecimento e desenvolvimento. Em seguida apresentam-se os conceitos de base sobre o atual toleranciamento geométrico, em desenhos de engenharia mecânica, e referem-se as alterações de sintaxe que foram necessárias para compatibilizar a utilização desta linguagem em desenhos de engenharia e em modelos em CAD 3D anotados. Por sua vez, como os valores das tolerâncias geométricas de forma, passíveis de serem especificados, estão a atingir uma magnitude tão pequena que a influência do estado de superfície (rugosidade), na sua avaliação, passa a ser significativa, torna-se necessário especificar, no indicador de tolerância, os critérios de associação e de filtragem adequados para assegurar uma diminuição das ambiguidades da descrição da função e de especificação. Finalmente, abordam-se os conceitos relativos à indicação e compreensão de referências especificadas e sistemas de referências especificadas, nomeadamente a definição do operador de especificação utilizado no seu estabelecimento.

No capítulo 8, analisam-se os requisitos de interdependência entre o tamanho e a geometria – os requisitos de máximo de matéria, de mínimo de matéria e de reciprocidade – que permitem uma avaliação dinâmica dos requisitos dimensionais e geométricos da peça mais adequada à função, com evidentes vantagens económicas para a produção.

No capítulo 9, aborda-se o conceito de “tolerâncias gerais”, relativas aos diferentes processos de fabricação utilizados, que permite não sobrecarregar os desenhos com informação sobre requisitos facilmente assegurados em processos de construção corrente, mantendo o carácter definitivo do desenho. Com a nova linguagem GPS, mostra-se que, neste âmbito, o toleranciamento geométrico geral, nomeadamente o de perfil, começa a adquirir grande preponderância, começando a restringir as tolerâncias dimensionais apenas às dimensões tamanhos.

No capítulo 10, principia-se pela apresentação de alguns dos conceitos fundamentais relativos às indicações dos estados de superfície e à sua importância para a funcionalidade das peças e para o controlo dos processos de fabricação, incluindo uma breve referência histórica sobre a evolução do estudo e dos métodos de avaliação da geometria das superfícies. Seguidamente, faz-se uma descrição sucinta de alguns dos mais importantes parâmetros caracterizadores do perfil de rugosidade e das indicações mínimas necessárias para se assegurar um controlo inequívoco das funções das superfícies, aproveitando-se também para fazer referência aos novos parâmetros de superfície (“*areal*”) utilizados para caracterizar microestruturas funcionais. Requisitos funcionais, importantes na indústria moderna, tais como a resistência ao desgaste, a eliminação de fugas de fluidos e da ocorrência de griagem em regime dinâmico, o comportamento a pressão elevada, as vedações metal-metal, a limitação de ruído em rolamentos, etc., são caracterizados pela metrologia de superfícies. Abordam-se ainda critérios para a especificação e avaliação quantitativas de parâmetros de rugosidade. Por último, faz-se referência a algumas relações entre parâmetros de perfil e novos parâmetros de superfície (“*areal*”).

Finalmente, no capítulo 11, apresentam-se conclusões e identificam-se possíveis áreas de atuação que permitam consolidar e interligar os conceitos expostos com os métodos de verificação existentes no DEMec – INEGI e na indústria, com vista a apoiar a indústria nacional nos seus esforços para incorporar as mudanças registadas, de modo a diminuir os litígios que ocorrem frequentemente entre os departamentos de controlo de fabricação e de controlo de receção de empresas que trabalham em “*outsourcing*”.

## 1.4 Referências

- [A1] – ALMACINHA, J. A. – *O Sistema Normativo para Uma Especificação Técnica de Produtos Adequada ao Mercado Global no Domínio da Construção Mecânica* [Em linha]. Rev. Tecnometal. Porto: AIMMAP. 2005, 159, p. 5-13. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://sigarra.up.pt/feup/pt/pubs\\_pesquisa.FormView?P\\_ID=13397](http://sigarra.up.pt/feup/pt/pubs_pesquisa.FormView?P_ID=13397)>.
- [B1] – BAROUH, M.; LINARES, J.-M.; BACHMANN, J. – *Tolérancement en ingénierie concourante: un cas industriel*. Qualité Espace. Paris: CNES. 2004, 41, p. 28-37.



- [B2] – BEAUFILS, Ph. – *Cotes et tolérances: tout le monde va se comprendre*. Industries et Techniques, Mars 1999, nº 802, ISSN 01506617, p. 76-79.
- [B3] – *Business Plan of ISO/TC 10 – Technical product documentation* [Em linha]. Versão 3. ISO, 2007-04-25, 19 p. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO\\_TC\\_010\\_Technical\\_product\\_documentation.pdf?nodeid=984765&vernum=-2](http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO_TC_010_Technical_product_documentation.pdf?nodeid=984765&vernum=-2)>.
- [B4] – *Business Plan of ISO/TC 213 – Dimensional and geometrical product specifications and verification* [Em linha]. Versão 5 Draft 1. ISO, 2008-01-09, 14 p. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO\\_TC\\_213\\_Dimensional\\_and\\_geometrical\\_product\\_specifications\\_and\\_verification.pdf?nodeid=999295&vernum=-2](http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO_TC_213_Dimensional_and_geometrical_product_specifications_and_verification.pdf?nodeid=999295&vernum=-2)>.
- [F1] – FENG, S. C.; HOPP, T. H. – *A review of Current Geometric Tolerancing Theories and Inspection Data Analysis Algorithms* [Em linha]. National Institute of Standards and Technology (NISTIR 4509), Gaithersburg. 1991, 19 p. [Consult. 22 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.mel.nist.gov/msidlibrary/doc/feng91.pdf>>.
- [H1] – HAMBURG-PIEKAR, D. S. – *Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas* [Em linha]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. 2006. 152 p. Dissertação de Mestrado. [Consult. 2 out. 2013]. Disponível em WWW:<URL:<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88352/228125.pdf?sequence=1>>.
- [H2] – HONG, Y. S.; CHANG, T.-C. – *A comprehensive review of tolerancing research* [Em linha]. Intern. Journal of Production Research. UK: Taylor & Francis Ltd. 2002, vol. 40, nº 11, p. 2425-2459. DOI: 10.1080/00207540210128242. [Consult. 20 nov. 2011]. Disponível em WWW:<<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207540210128242>>.
- [S1] – SRINIVASAN, V. – *Reflections on the role of science in the evolution of dimensioning and tolerancing standards* [Em linha]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. UK: IMechE. 2013, 227, p. 3-11. [Consult. 8 abr. 2013]. Disponível em WWW: <URL:<http://pib.sagepub.com/content/227/1/3.full.pdf>>.
- [V1] – VOELCKER, H. B. – *The current state of affairs in dimensional tolerancing: 1997* [Em linha]. Integrated Manufacturing Systems. USA: MCB University Press. 1998, vol. 9, nº 4, p. 205-217. ISSN 00957-6061. [Consult. 3 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=850763>>.

#### 1.4.1 Normalização

ISO 8015:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals – Concepts, principles and rules. ISO.
ISO 9000 (series)	– Quality management systems. ISO [série NP EN ISO 9000 IDT].
ISO 14638:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Matrix model. ISO.
ISO/TR 14638:1995	– Geometrical product specification (GPS) – Masterplan. ISO.
ISO/TR 23605:2009	– Technical product specification (TPS) – Application guidance – International model for national implementation. ISO.



## **CAPÍTULO 2**

**Introdução ao conceito de normalização em geral  
e sua importância na engenharia**



## Capítulo 2

# Introdução ao conceito de normalização em geral e sua importância na engenharia

## 2.1 Considerações gerais

A globalização da economia mundial registada nas três últimas décadas foi acompanhada por um grande desenvolvimento da Normalização nos mais variados domínios da atividade humana, de modo a facilitar o intercâmbio técnico-comercial justificado e, muitas vezes, praticamente imposto pelas necessidades da atual organização económico industrial global.

No século XX, as primeiras atividades normativas de âmbito internacional, que começaram a ser desenvolvidas ainda na parte final da década de 20, atribuíram particular importância à engenharia mecânica, em domínios tais como roscas, rolamentos, engrenagens, etc., mas também ao desenho técnico, às tolerâncias e ajustamentos e aos estados de superfície, que são matérias fundamentais ao nível da documentação técnica e da especificação geométrica de produtos.

Os conceitos nos domínios da Documentação técnica e da Especificação e verificação geométricas de produtos, desenvolvidos nas universidades e em centros de investigação, vão sendo posteriormente trabalhados, no seio das organizações nacionais e internacionais de normalização, de modo que possam vir a ser postos ao serviço da economia e da engenharia mundiais, nomeadamente no apoio ao desenvolvimento de produtos.

## 2.2 Origens históricas e evolução

A linguagem falada e, mais tarde, a escrita, que se desenvolveram para possibilitar a comunicação entre os homens, podem ser consideradas como formas primordiais de normalização. Existem registos, desde a antiguidade, de ações tendentes a definir, unificar e simplificar (ou seja, normalizar) produtos acabados e elementos utilizados na sua produção, podendo, a título de exemplo, assinalar-se algumas das mais importantes etapas do processo de normalização [M1, M2, M4, S1 e R1]:

- A adoção do “primeiro” padrão de comprimento – distância entre dois nós de uma vara de bambu que, quando soprada, permitia reproduzir uma determinada nota musical (som de frequência específica) – na China, no século XXVII a.C.

- A utilização de sistemas de unidades de medida de comprimento e de massa que permitiam efetuar medições com boa exatidão, na Civilização do Vale do Indo, cerca de 2600 a.C.
- A construção de pirâmides com blocos de pedra de dimensões unificadas, no Egito, por volta de 2500 a.C.
- A fabricação de tijolos de formato único e ânforas de dimensões e formas unificadas, no Egito, sob o domínio do faraó Tutmés I (1530 - 1520 a.C.).
- A existência de regras escritas para a construção de obras públicas (Códice do templo de Elêusis), na Grécia, no século IV a.C.
- A utilização de tijolos e diâmetros de tubos para aquedutos normalizados, em Roma (séc. I a.C.).
- O aparelhamento de navios com mastros, velas, remos e barras do leme com características unificadas, em Veneza (Arsenal de Veneza), no século XV.
- A adoção do sistema métrico decimal, em França, através da Lei de 1 de Agosto de 1793.
- A promoção da utilização do conceito de intermutabilidade na indústria de armamento, por Eli Whitney (1765-1825), nos USA, no final do século XVIII (1798).
- A elaboração de normas relativas à construção de veículos sobre carris, pelas Administrações Ferroviárias, e de segurança em navios, pelas Sociedades de Seguros, no século XIX.
- O estabelecimento de um sistema de diâmetros e passos normalizados para elementos roscados (rosca inglesa ou rosca Whitworth), por Sir Joseph Whitworth, em 1841, no Reino Unido.

No entanto, só com o progresso registado com a Revolução Industrial do século XIX e com a industrialização para a produção em série de automóveis, nos USA, no início do século XX, surgiu a necessidade de estender a Normalização aos níveis industrial e nacional. Adicionalmente, as dificuldades sentidas, no campo da cooperação técnica e militar, pelos Países Aliados, no decurso da Segunda Guerra Mundial, puseram em evidência a necessidade de se caminhar decididamente para a Normalização no plano internacional. A título de exemplo, pode referir-se o facto de a não existência de normalização internacional no domínio dos perfis e passos das roscas ter custado cerca de 1000 milhões de dólares aos Aliados [V1]. Neste enquadramento, entre as principais ações desenvolvidas em prol da Atividade Normativa merecem destaque:

- A fundação da **VDI** (Associação dos Engenheiros Alemães), em 1856, que procedeu à publicação da sua primeira recomendação *sobre* caldeiras e máquinas a vapor, em 1884.
- A instituição do **BIPM** (*Bureau* Internacional de Pesos e Medidas), no âmbito da Convenção do Metro assinada por dezassete países, em Paris, em 1875, com a tarefa de assegurar a unificação mundial de medições físicas.

- A criação da **VDE** (Associação dos Engenheiros Eletrotécnicos Alemães), em 1893, primeiro organismo que se dedicou à *elaboração* de regulamentos sobre equipamentos elétricos, cujo primeiro regulamento VDE, o VDE 0100 sobre construção e montagem de instalações elétricas, foi publicado em 1894.
- A fundação do **BESC** – “*British Engineering Standards Committee*”, em 1901, primeiro organismo nacional de normalização e antecessor da atual “*British Standards Institution*” (**BSI**), constituída em 1931.
- A criação do **NBS** – “*National Bureau of Standards*”, em 1901, agência no âmbito do Departamento do Comércio dos USA e antecessora do atual “*National Institute of Standards and Technology*” (**NIST**), constituído em 1988.
- A criação da **IEC** – Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI), para o desenvolvimento da atividade normativa internacional no domínio eletrotécnico, em Londres, em 1906, atualmente com sede em Genebra.
- A fundação do **NADI** – “*Standardisation Committee of German Industry*”, em 1917, antecessor do atual Instituto Alemão de Normalização (**DIN**), constituído em 1975, cuja primeira norma, a DIN 1 sobre pinos cónicos, foi publicada em 1918.
- A criação do **AESC** – “*American Engineering Standards Committee*”, em 1918, antecessor do atual “*American National Standards Institute*” (**ANSI**), organização privada sem fins lucrativos, constituída em 1969.
- A criação da **ISA** – “*International Federation of the National Standardizing Associations*”, para o desenvolvimento da atividade normativa internacional, nos outros domínios para além da eletrotecnia e em particular na engenharia mecânica, em 1926, em Nova Iorque, formalmente estabelecida, em 1928, em Praga. As atividades da ISA cessaram em 1942, em resultado da Segunda Guerra Mundial.
- A criação da **CEP** – Comissão Eletrotécnica Portuguesa, em 1929, antecessora do atual Instituto Eletrotécnico Português (**IEP**), constituído em 1981.
- A criação da **ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas, em 1940.
- A criação da **ISO** – “*International Organization for Standardization*”, com sede em Genebra, a partir da união da **ISA** e da **UNSCC** (“*United Nations Standards Coordinating Committee*”) para facilitar a coordenação e a unificação internacionais das normas industriais, em 1947.
- A criação da **IGPAI** – Inspeção Geral dos Produtos Agrícolas e Industriais, em 1948, antecessora do atual Instituto Português da Qualidade (**IPQ**), constituído em 1986.
- A criação do **CEN** – Comité Europeu de Normalização, em 1961, com o objetivo de permitir a elaboração de normas europeias destinadas a promover a competitividade da indústria europeia no mundo e contribuir para a criação de um mercado interno europeu, com sede em Bruxelas, desde 1975.

- A fundação da **COPANT** – Comissão Pan-americana de Normas Técnicas para a elaboração de normas para o mercado latino-americano, a partir das recomendações e normas da ISO e da IEC, em 1961.
- A fundação da **ASAC** – “*Asian Standards Advisory Committee*”, organismo regional asiático de normalização, em 1966.
- A criação do **PASC** – “*Pacific Area Standards Congress*”, em Honolulu, em 1972.
- A criação do **CENELEC** – Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica, em 1973.
- A criação da **ARSO** – “*African Regional Organization for Standardization*”, para efetuar a coordenação da normalização em África, em 1977.
- A criação da **AIDMO** – “*Arab Industrial Development and Mining Organization*”, em 1980.
- A criação do **ETSI** – “*European Telecommunications Standards Institute*”, por iniciativa dos membros da Conferência Europeia das Administrações de Correios e Telecomunicações, em 1988.
- O estabelecimento do **INNOQ** – Instituto Nacional de Normalização e Qualidade, através do D.L. 02/93 do Conselho de Ministros de Moçambique, no seio do Ministério da Indústria e Energia, em 1993.
- A criação do **IANORQ** – Instituto Angolano de Normalização e Qualidade, no âmbito do Ministério da Indústria, em 1996.

## 2.3 Objetivos e importância da Normalização

De acordo com a definição da norma NP EN 45020:2009:

A **Normalização** é a atividade destinada a estabelecer, face a problemas reais ou potenciais, disposições para utilização comum e repetida, tendo em vista a obtenção do grau ótimo de ordem, num determinado contexto. Consiste, de um modo particular, na formulação, edição e implementação de **Normas**.

A importância da Normalização pode ser constatada nas mais diversas atividades desenvolvidas, no dia-a-dia, por pessoas e instituições, podendo assinalar-se, a título de exemplo [M4]:

- A utilização de formatos de papéis (em desenhos, impressos, etc.) normalizados internacionalmente (a norma original, DIN 476, foi publicada pelo DIN, em 1922) permite reduzir os desperdícios na produção de papel, aumentar a produtividade das indústrias tipográfica e de papelaria, etc.
- A existência de normas para a construção, instalação e funcionamento de aparelhos elétricos industriais e domésticos é fundamental para a segurança de pessoas e bens.



- O uso da designação ISO na caracterização da sensibilidade das películas, adotada mundialmente, entre outras normas respeitantes ao material fotográfico, facilita muito a vida dos utilizadores.
- A normalização dos contentores de mercadorias, ao nível internacional, permite a todos os elementos de uma cadeia de transportes – instalações portuárias e aeroportuárias, caminhos-de-ferro, redes rodoviárias e embalagem – uma integração eficaz.
- A utilização mundial de elementos com roscas métricas ISO possibilitou a eliminação de um importante obstáculo técnico às trocas comerciais, reduzindo os problemas de manutenção.

A Normalização busca a definição, a unificação e a simplificação, de forma racional, quer dos produtos acabados, quer dos elementos que se empregam para os produzir, através do estabelecimento de documentos chamados Normas.

O termo “definição” significa caracterizar qualitativa e quantitativamente todos os materiais, objetos e elementos que se utilizam na produção, bem como os próprios produtos finais. Os termos “unificação” e “simplificação” têm em vista a redução, ao mínimo, das variedades dos materiais, das ferramentas e operações do processo produtivo e ainda dos produtos acabados.

As vantagens mais significativas, que resultam da atividade normativa, podem ser enumeradas, resumidamente [M4 e N1]:

- o fornecimento de meios de comunicação entre todas as partes interessadas;
- a simplificação e a redução do tempo de projeto;
- a economia de matérias-primas;
- a economia de tempos de produção;
- uma melhor organização e coordenação do processo produtivo;
- a proteção dos interesses dos consumidores, através da garantia de uma adequada qualidade dos bens e dos serviços, desenvolvida de forma coerente;
- uma melhor especificação dos produtos a vender e a encomendar, evitando-se as amostras;
- uma maior economia resultante da fácil intermutabilidade das peças;
- a promoção da qualidade de vida: segurança, saúde e proteção do ambiente;
- a promoção do comércio, através da supressão dos obstáculos originados pelas diferentes práticas nacionais.

A NP EN 45020:2009 define **Norma** como um documento, estabelecido por consenso e aprovado por um organismo reconhecido, que define regras, linhas de orientação ou características para atividades ou seus resultados, destinadas à utilização comum e repetida, visando atingir um grau ótimo de ordem, num dado contexto.

As normas deverão ser fundamentadas em conhecimentos da ciência, da técnica e da experiência, visando a otimização de benefícios para a comunidade, no respetivo contexto específico da sua aplicação.

As normas definem características de bens ou serviços, tais como os níveis de qualidade ou de eficiência, a segurança ou as dimensões. Deve registar-se que, embora, normalmente, a sua aplicação não seja obrigatória, as normas têm hoje um papel relevante nas relações industriais e comerciais. A utilização de uma marca de conformidade com as normas, como por exemplo **CE**, dá, aos consumidores, uma determinada garantia de qualidade dos respetivos bens ou serviços.

As atividades de avaliação da conformidade visam, normalmente, demonstrar que um dado bem, produto, processo ou serviço cumpre com os requisitos que lhe são aplicáveis. Nalguns casos, a avaliação da conformidade é legalmente exigida, normalmente relacionada com a segurança desse produto ou serviço.

A avaliação da conformidade pode também ser uma exigência contratual ou uma garantia de que um dado produto ou serviço se adequa ao uso pretendido. Com o evoluir da sociedade, novas áreas da avaliação da conformidade aparecem, outras transformam-se ou desaparecem. Estas atividades de avaliação são desenvolvidas por entidades acreditadas em termos nacionais e/ou internacionais.

O Instituto Português de Acreditação, I.P. (IPAC) é o organismo nacional de acreditação requerido pelo Regulamento (CE) n.º 765/2008, tendo sido criado em 2004. A atividade de acreditação consiste na avaliação e reconhecimento da competência técnica de entidades para efetuarem atividades específicas de avaliação da conformidade (p. ex. ensaios, calibrações, certificações e inspeções).

A acreditação diferencia-se da certificação em vários aspetos, nomeadamente nos critérios e metodologias usadas, bem como por haver apenas uma entidade acreditadora, a qual efetua a regulação dos organismos de certificação. O IPAC dispõe de um Diretório das entidades nacionais por ele acreditadas (Organismos de certificação, Organismos de inspeção, Laboratórios de ensaio e Laboratórios de calibração).

## 2.4 Diferentes tipos de normas

Existem várias tipologias das normas [V1 e N1]:

- a) A **Tipologia estrutural** que estabelece a distinção entre norma de meios e norma de resultados ou de desempenho (“*performance*”).

A **norma de meios** descreve de forma precisa os meios a utilizar para que o seu objeto apresente efetivamente as características exigidas. Portanto, em princípio, estas normas são muito pormenorizadas e podem descrever, nos mais ínfimos pormenores, o processo de

produção a utilizar, bem como todas as características técnicas dos materiais e componentes utilizados.

A **norma de desempenho (ou de resultados)** limita-se a descrever de forma precisa as características exigidas do seu objeto, sem descrever a sua constituição interna, nem os meios necessários à obtenção do resultado pretendido.

Os normalizadores têm, atualmente, tendência para privilegiar a norma de desempenho relativamente à norma de meios, por duas razões. A primeira é que a norma de meios pode dar origem a entraves técnicos às trocas comerciais; a segunda é que a norma de meios, ao fixar a técnica num dado momento, pode constituir um obstáculo ao progresso das tecnologias.

Deve notar-se, no entanto, que proceder unicamente com base em normas de desempenho pode levar a processos de ensaio complicados, de longa duração e de custos elevados, cuja prescrição se torna necessária em virtude da ausência de qualquer descrição precisa dos meios.

- b) A **Tipologia funcional** que distingue os diferentes tipos de normas consoante o seu conteúdo. Existem várias classificações, mais ou menos pormenorizadas, podendo reter-se aqui as seguintes:

**Norma de base:** norma de alcance geral que contém as disposições gerais aplicáveis a um domínio, especial ou não (p. ex. normas sobre princípios gerais respeitantes a grandezas, unidades e símbolos, normas de medição, etc.).

**Norma de terminologia:** norma que trata exclusivamente dos termos, geralmente acompanhados da sua definição e, por vezes, de símbolos, de notas explicativas, de ilustrações, de exemplos (p. ex. vocabulário de estruturas, vocabulário de normalização e certificação, etc.).

**Norma de produtos:** norma que especifica a totalidade ou parte dos requisitos que um produto ou um grupo de produtos devem satisfazer, para cumprir o seu objetivo (p. ex. normas sobre parafusos, resistências elétricas, óleos, etc.).

**Norma de ensaios:** norma que trata de métodos de ensaio destinados a verificar a adequação de um produto ou de um material às características exigidas àquele. A norma pode igualmente incluir prescrições relativas ao ensaio considerado, tais como a amostragem, a utilização, os métodos estatísticos, etc. (p. ex. normas de ensaio de tração, sobre ensaios do comportamento de um óleo, etc.).

**Norma de segurança:** norma que contém prescrições destinadas a garantir a segurança de pessoas, animais e bens.

**Norma de serviço:** norma que especifica a totalidade ou parte dos requisitos a que deve responder um serviço para cumprir o seu objetivo.

**Norma de engenharia ou de planificação:** norma que permite o cálculo, a realização, a implantação de materiais, de aparelhos, de estruturas, bem como as condições de aplicação ou de funcionamento.

**Norma de organização:** norma que indica os métodos de organização para a eficácia das diversas funções da empresa (p. ex. a função qualidade que gere o sistema de qualidade da empresa em conformidade com as normas da série ISO 9000 ou os organismos de certificação e de acreditação que uma organização, em conformidade com as normas da série EN ISO/IEC 17000, deve ter).

**Norma de interface:** norma que especifica requisitos relacionados com a compatibilidade de produtos ou sistemas, nas suas áreas de comunicação.

**Norma de eficiência:** norma que especifica requisitos do produto referentes a uma ou mais características relativas à sua adequação à respetiva finalidade.

**Norma descritiva:** norma de produto que especifica os requisitos relativos a uma ou mais características descritivas.

- c) A **Tipologia administrativa:** esta tipologia apenas se evoca a título indicativo; com efeito, trata-se de distinguir as normas consoante a sua classificação administrativa nas várias coleções de normas nacionais: norma definitiva ou experimental, por exemplo.

A atividade normativa em domínios específicos teve o seu início nas empresas tecnologicamente mais evoluídas, estendeu-se, seguidamente, aos correspondentes setores de atividade, adquiriu mais tarde um carácter nacional, e com o incremento do comércio mundial surgiu a necessidade da existência de normalização de âmbito internacional. De acordo com o seu campo de aplicação (ver figura 2.1), as normas podem designar-se como:

- **Normas de empresa:** normas estabelecidas no seio de uma unidade industrial (p. ex. normas RENAULT, EFACEC, VOLVO, SAAB, etc.).
- **Normas de indústria:** normas estabelecidas ao nível de um setor ou ramo industrial (p. ex. normas CNOMO, ASME, ASTM, etc.).
- **Normas nacionais:** normas estabelecidas para todo um país, por um organismo nacional de normalização (p. ex. normas NP, DIN, NF, BS, ANSI, NBR, etc.).
- **Normas regionais:** normas adotadas por uma organização regional de normalização, ou, em certos casos, especificação técnica adotada por um organismo regional com funções de normalização (p. ex. normas EN, ETS, etc.).
- **Normas Internacionais:** normas adotadas por uma organização internacional de normalização, ou, em certos casos, especificação técnica adotada por um organismo internacional com funções de normalização (p. ex. normas ISO, IEC, etc.).



Figura 2.1 – Diferentes níveis de Normalização e tipos de documentação produzida

Presentemente, o avanço da liberalização do comércio mundial e a interpenetração dos vários setores industriais levaram a uma inversão no sentido do desenvolvimento da atividade normativa, nos domínios de interesse geral. Assim, os trabalhos de normalização sobre assuntos de interesse mundial são, normalmente, desenvolvidos sob a direção da ISO e, quando apresentam interesse para a Normalização europeia, são acompanhados no seio do CEN. As normas elaboradas a este nível são, posteriormente, adotadas como normas nacionais, pelos respetivos **Organismos Nacionais de Normalização (ONN)** e, finalmente, consagradas nos procedimentos internos dos diferentes setores industriais e das empresas.

## 2.5 Alguns aspetos da Normalização internacional (ISO e IEC)

A **ISO (Organização Internacional de Normalização)**, criada em 1947, é uma federação mundial de organismos nacionais de normalização de mais de 160 países, à razão de um organismo por país, tendo um carácter não-governamental [K1, M6]. A ISO colabora estreitamente com a **Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC)** em todos os assuntos de normalização eletrotécnica.

Normalmente, o trabalho de elaboração das normas internacionais é confiado aos **comités técnicos da ISO (ISO/TC)** e seus **subcomités (ISO/TC/SC)**. Cada organismo membro, interessado num assunto para o qual foi constituído um comité, tem o direito de se fazer representar nesse comité. Organizações internacionais, governamentais e não-governamentais, em cooperação com a ISO, participam também nesse trabalho.

Os projetos de normas internacionais ISO/DIS e ISO/FDIS adotados pelos ISO/TC são submetidos aos organismos membros para votação. A publicação como Norma internacional requer a aprovação de pelo menos 75 % dos organismos membros votantes. A ISO elabora normas desde 1 de janeiro de 1972 (ver exemplo na figura 2.2). Deve ser registado que, entre 1951 e aquela data, os documentos normativos elaborados tinham apenas o estatuto de recomendações (ISO/R).

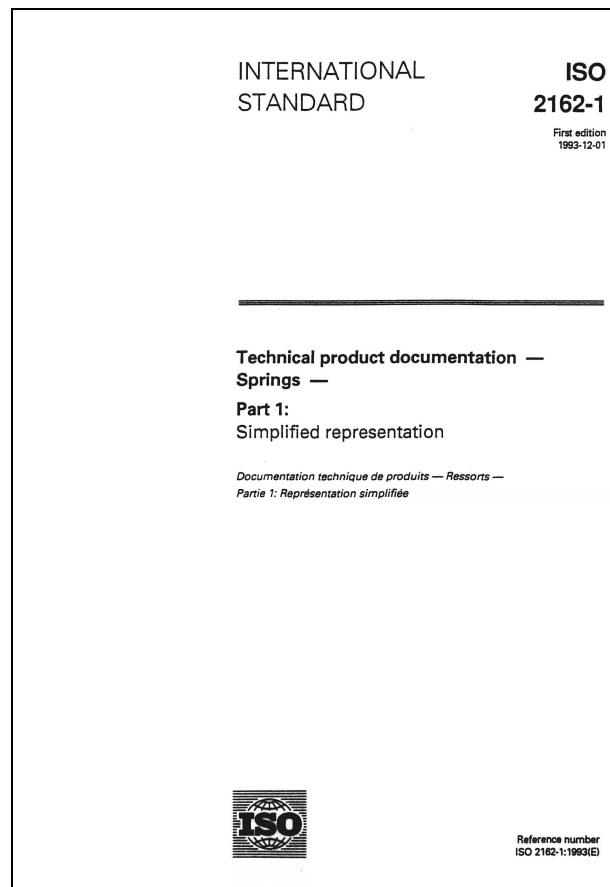


Figura 2.2 – Página de rosto de uma norma ISO

A ISO, para além da publicação de **Normas**, promove a elaboração de outros documentos normativos:

- **Especificação Disponível Publicamente (ISO/PAS)** (*“Publicly Available Specification”*): documento normativo representando o consenso, no âmbito de um grupo de trabalho (WG) ISO, publicado para responder a uma necessidade urgente do mercado. Normalmente, a decisão de publicação de uma PAS é tomada no início dos trabalhos, ao mesmo tempo que decorre a aprovação da proposta de um novo estudo (NP).
- **Especificação Técnica (ISO/TS)**: documento normativo representando o consenso técnico, no seio de um comité ISO. A decisão da sua elaboração pode ser tomada: i) no começo dos trabalhos de um TC/SC, com a aprovação de nova proposta de trabalho; ii) em casos em que um TC tinha decidido produzir uma norma ISO, mas, posteriormente, descobriu que não existia apoio suficiente para a sua publicação; iii) por proposta de um membro de um TC, no sentido de adotar, como ISO/TS, um documento existente.
- **Relatório Técnico (ISO/TR)**: documento informativo contendo informações de um tipo diferente daquelas que são, normalmente, objeto de um documento normativo. Em circunstâncias excecionais, um TC pode decidir, por maioria simples dos seus membros participantes, publicar um TR (com o estado-da-arte sobre um dado assunto, por exemplo), que não precisa de ser revisto até que a informação aí fornecida deixe de ser considerada válida ou útil.
- **Acordo técnico IWA** (*“International Workshop Agreement”*): documento técnico elaborado num fórum exterior à estrutura técnica da ISO, mas com o apoio administrativo de um organismo membro da ISO previamente designado para tal. Este mecanismo permite responder mais rapidamente às exigências em matéria de normalização, em setores onde a

ISO não dispõe ainda de peritos ou estruturas técnicas apropriadas. O IWA permite introduzir mais rapidamente no mercado um documento normativo (publicado em menos de 12 meses), com a possibilidade de o transformar a breve prazo em norma de facto e, a mais longo termo, em Norma internacional.

O processo de elaboração de normas e produtos ISO (ver figura 2.3) comporta seis estádios:

– **Estádio 1:** estágio de proposição

Apresentação de propostas de novos assuntos de trabalho:

NP – Novo projeto aprovado, nenhum projeto de trabalho disponível.

– **Estádio 2:** estágio preparatório

Preparação de projetos (“*drafts*”) de trabalho:

AWI – Estudo aprovado (“*Approved Work Item*”), nenhum projeto de trabalho disponível.

AWI Amd – Proposta aprovada de Emenda (documento com correções técnicas).

AWI TR ou TS – Proposta aprovada de Relatório técnico ou de Especificação técnica.

WD – Projeto de trabalho (“*Working draft*”).

WD Amd – Projeto de trabalho de uma Emenda.

WD TR ou TS – Projeto de trabalho de um Relatório técnico ou de uma Especificação técnica.

– **Estádio 3:** estágio de comité

Exame e aprovação de projetos (“*drafts*”) de comité com vista à sua submissão como projetos de Norma internacional (DIS):

CD – Projeto de comité (“*Committee Draft*”).

CD Amd – Projeto de comité de uma Emenda.

CD Cor – Projeto de comité de uma Errata (ou Corrigenda) técnica (documento que contém correções editoriais ou atualizações de informação às normas ou às emendas editadas).

CD TR ou TS – Projeto de comité de um Relatório técnico ou de uma Especificação técnica.

DTR – Projeto de Relatório técnico.

PD Amd – Projeto de Emenda proposta.

– **Estádio 4:** estágio de inquérito

Distribuição dos projetos de Norma internacional (DIS), pelos organismos membros da ISO, para análise e votação:

DIS – Projeto de Norma internacional (“*Draft International Standard*”).

Damd – Projeto de Emenda.

FCD – Projeto de comité final.

FPDISP – Projeto final de perfil normalizado internacional proposto.

– **Estádio 5:** estágio de aprovação

Distribuição dos projetos finais de Norma internacional (FDIS), pelos organismos membros da ISO, para votação final:

FDIS – Projeto final de Norma internacional (“*Final Draft International Standard*”).

FD Amd – Projeto final de Emenda.

PRF – Prova de uma nova Norma internacional.

PRF Amd	– Prova de uma Emenda.
PRF TTA	– Prova de uma Avaliação de tendências tecnológicas.
PRF TR ou TS	– Prova de um Relatório técnico ou de uma Especificação técnica.
PRF Suppl	– Prova de um Suplemento.

– **Estádio 6:** estágio de publicação

Publicação de documentos normativos sob a forma de:

ISO	– Norma internacional.
TR ou TS	– Relatório técnico ou Especificação técnica.
IWA	– Acordo técnico IWA.
TTA	– Avaliação de tendências tecnológicas ( <i>“Technology Trend Assessment”</i> ).
Amd	– Emenda.
Cor	– Errata (ou Corrigenda) técnica.

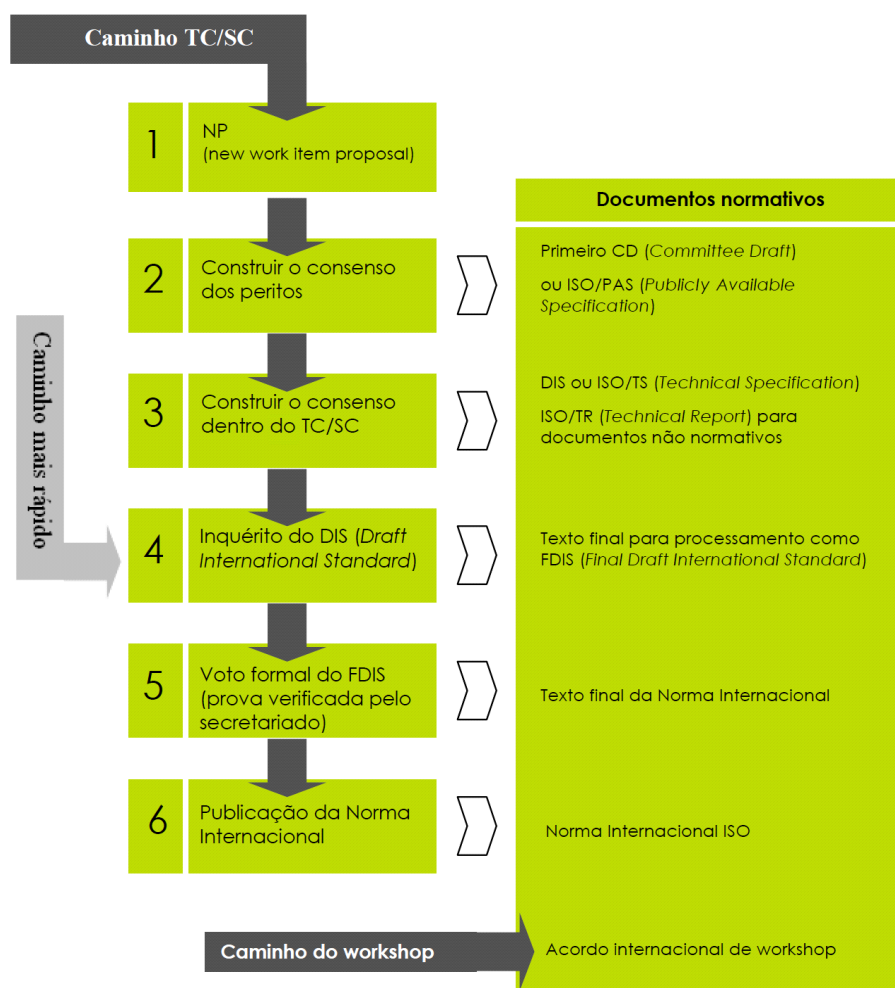


Figura 2.3 – Processo de elaboração de normas e produtos ISO [M4]

As normas ISO e as publicações técnicas WD, CD, DIS e FDIS são completamente protegidas pelos direitos de autor da ISO. A reprodução de projetos/”drafts” ISO é autorizada de forma gratuita apenas para utilização no processo de desenvolvimento de normas, apesar de serem documentos protegidos com direitos de autor, e continua sujeita a outras limitações de reprodução e redistribuição.



As publicações ISO são documentos comerciais e não poderão ser copiados sem autorização explícita do gestor dos direitos de autor da ISO (copyright@iso.org). No entanto, a ISO aceita o princípio de distribuição de publicações para fins de normalização.

## 2.6 Alguns aspetos da Normalização europeia (CEN e CENELEC)

O **CEN (Comité Européen de Normalização)**, criado em 1961, é uma associação internacional de carácter científico e técnico composta pelos organismos nacionais de normalização dos países membros da União Europeia e de outros países europeus. Os membros do CEN e do CENELEC são igualmente membros da ISO e da IEC (para a normalização eletrotécnica).

A Normalização europeia (EN) constitui um fórum insubstituível para organizar e facilitar os contactos entre os diversos intervenientes económicos na Europa. Um dos meios de que dispõem o CEN e o CENELEC é constituído pela transposição para o nível europeu das normas internacionais da ISO e da IEC (EN ISO) (ver exemplo na figura 2.4). O CEN e o CENELEC promovem, simultaneamente, a aplicação das normas internacionais nos diferentes países.

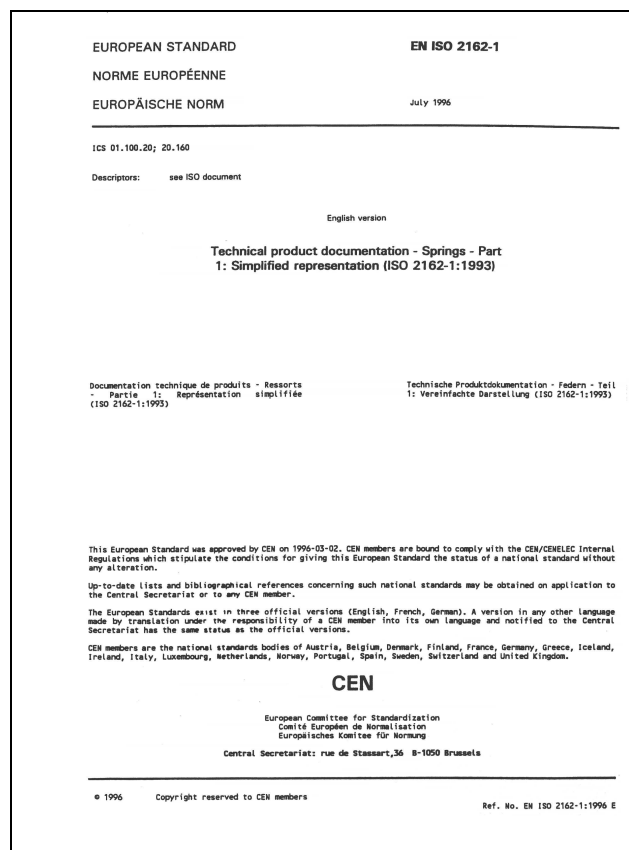


Figura 2.4 – Página de rosto de uma norma EN

Os trabalhos técnicos são executados, em geral, por **comités técnicos (CEN/TC)**, sendo a publicação de normas EN antecedida pela elaboração de Projetos de Norma europeia (prEN).

Em termos de União Europeia podem, também, ser consideradas as seguintes definições:

- **Especificação (técnica)**: documento que define o conjunto de requisitos relativamente às características de um produto, processo, serviço ou sistema.
- **Norma oficial**: especificação, estabelecida por consenso e aprovada por um organismo de normalização reconhecido, para aplicação repetida ou continuada, cuja observância não é obrigatória.
- **Norma de facto**: especificação reconhecida a nível do mercado, normalmente devido a larga aceitação dos produtos de um fabricante que domina o mercado.
- **Especificação disponível publicamente (PAS)**: uma norma *de facto* cuja utilização não se encontra limitada pela existência de direitos de propriedade intelectual.
- **Regulamentação (técnica)**: documento que estabelece as disposições legislativas de carácter obrigatório.

O CEN tem como objetivo fortalecer o desenvolvimento do comércio e da troca de serviços, contribuindo para a eliminação de entraves de natureza técnica. O CEN trata de assuntos dos mais variados domínios, excluindo os de eletrotecnia que são tratados pelo CENELEC, criado em 1973.

## 2.7 Alguns aspetos da Normalização nacional (IPQ)

O IPQ (Instituto Português da Qualidade), criado em 1986, é o organismo nacional que gere e desenvolve o Sistema Português da Qualidade (SPQ) – enquadramento legal de adesão voluntária para os assuntos da qualidade. A atual lei orgânica do IPQ foi aprovada pelo D.L. 71/2012.

Enquanto Organismo Nacional de Normalização (**ONN**), cabe ao IPQ coordenar diretamente ou com a colaboração de **Organismos com funções de Normalização Setorial (ONS)** por ele reconhecidos, a atividade normativa nacional. As Normas Portuguesas (NP) são, regra geral, elaboradas por **Comissões Técnicas Portuguesas de Normalização (CT)**, nas quais participam especialistas representando todas as partes interessadas (ver figura 2.5).

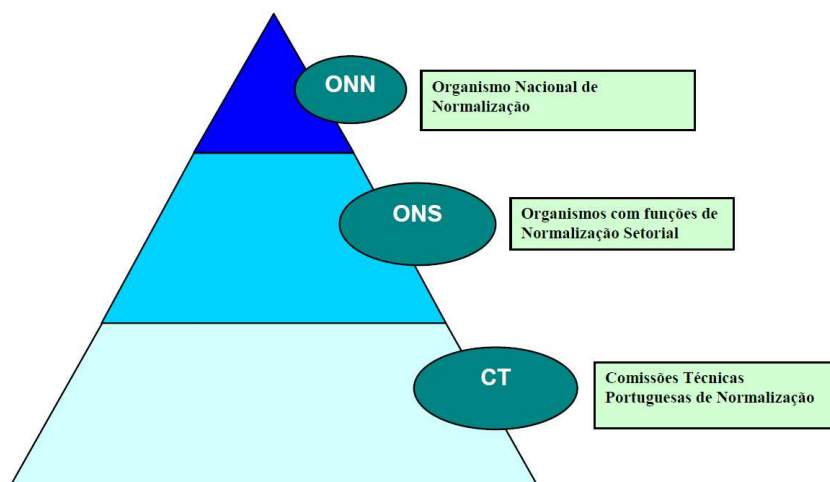


Figura 2.5 – Estrutura nacional de normalização [M4]

O IPQ reconhece entidades públicas e privadas ou mistas como ONS, em domínios específicos, proporcionando às CTs o apoio necessário ao seu regular funcionamento. As **Normas Portuguesas (NP)** podem ser elaboradas diretamente pelas CTs ou resultar da adoção de normas regionais ou internacionais, com a elaboração das respetivas versões portuguesas (NP EN, NP EN ISO ou NP ISO) (ver exemplo na figura 2.6).

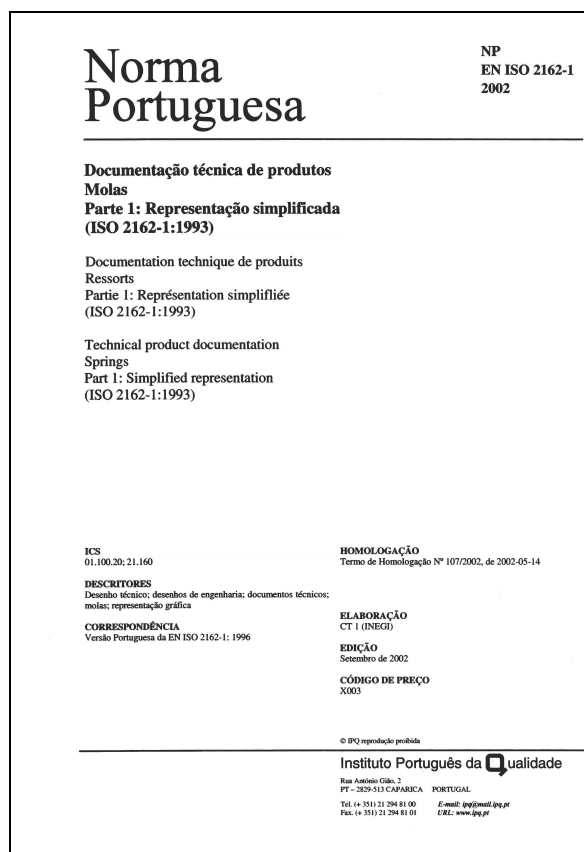


Figura 2.6 – Página de rosto de uma norma NP

Atualmente, a elaboração direta de Normas portuguesas (NP), no seio das CTs, apenas se justifica em domínios de interesse exclusivamente nacional. Neste âmbito, cada CT começa por elaborar Anteprojetos de norma (aNP) que, depois de aprovados pelo organismo que coordena essa CT, são transformados em Projetos de norma (prNP) e sujeitos a inquérito público. Terminado o prazo de inquérito e caso os comentários recebidos não obriguem a submeter um prNP a novo inquérito, o documento é enviado ao ONN para aprovação e homologação.

Por outro lado, enquanto membro da União Europeia, Portugal deve adotar as Normas Europeias (EN), elaboradas no contexto do Comité Europeu de Normalização (CEN), de acordo com o ponto 11.2.6.4 das Regras Comuns do CEN/CENELEC para o Trabalho de Normalização (“CEN/CENELEC *Internal Regulations. Part 2: Common Rules for Standardization Work*”). As CTs dos respetivos domínios deverão preparar versões portuguesas desses documentos que serão editadas como **Normas Portuguesas (NP EN e NP EN ISO)**, de acordo com o ponto 11.2.6.3 das Regras referidas).

Finalmente, as normas sobre assuntos de interesse mundial, elaboradas sob a direção da ISO, que não tenham sido objeto de acompanhamento no seio do CEN, deverão ser, após elaboração das respetivas versões portuguesas pelas CTs dos correspondentes domínios específicos, adotadas como **Normas Portuguesas (NP ISO)**, pelo ONN.

A pesquisa sobre Normas portuguesas pode ser realizada através da consulta em linha (“*online*”) do “Catálogo IPQ de Documentos Normativos”, disponível no sítio *web* (“*website*”) do Instituto Português da Qualidade (<http://www1.ipq.pt/PT/Pages/Homepage.aspx>). Nos catálogos de Normas disponíveis na generalidade dos sítios dos diversos Organismos de Normalização, a ordenação dos documentos normativos é feita de acordo com a “Classificação internacional para as normas” (ICS – “*International Classification for Standards*”) desenvolvida pela ISO.

## 2.8 Referência à atividade do INEGI enquanto ONS reconhecido pelo IPQ

O Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI) é uma Instituição de interface, entre a Universidade e a Indústria, vocacionada para a realização de atividades de Transferência de Tecnologia e de Inovação de base tecnológica orientadas para o apoio ao desenvolvimento do tecido económico, tendo nascido, em 1986, no seio do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

O contacto do INEGI com largas dezenas de profissionais de setores diferenciados da atividade económica, ao longo dos vários cursos de especialização em “Desenho de Construção Mecânica”, realizados na década de 80 do século passado e ministrados por docentes da Secção de Desenho Industrial (SDI) do DEMec (que, entre 1990 e 2008, teve a designação de DEMEGI – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), permitiu fazer um levantamento das carências então existentes, no meio empresarial e nas PME em particular, ao nível da divulgação e acessibilidade da informação técnica nos domínios da Mecânica e do Desenho técnico, nomeadamente no que respeita à Normalização.

Os trabalhos desenvolvidos até então, pela SDI, no âmbito do ensino universitário e da formação profissional contribuíram para reforçar a convicção de que a existência de um acervo documental atualizado, nos domínios do “Desenho técnico” e dos “Elementos de ligação mecânicos”, em língua portuguesa, seria um fator importante para permitir alargar a difusão destes conhecimentos de base, ao nível das atividades industriais e de desenvolvimento de produtos, fundamentalmente em termos das PME, e no contexto das atividades de formação.

O “Desenho técnico” (englobado na Documentação técnica de produtos) é essencial para a criação e a comunicação, em praticamente todos os setores da atividade económica. O “Desenho de engenharia mecânica” tem um papel assinalável no desenvolvimento tecnológico, materializando-se

em documentos fundamentais para o estabelecimento de contratos empresariais, particularmente no foro internacional.

Por sua vez, os “Elementos de ligação mecânicos” são utilizados em, praticamente, todos os ramos da indústria e a sua intermutabilidade e qualidade são características extremamente importantes, numa produção cada vez mais automatizada.

No novo ambiente de globalização, então em desenvolvimento, em que o “*outsourcing*” de tarefas de produção e a utilização de subcontratação passaram a ser comuns, os técnicos necessitavam de dispor de ferramentas normalizadas a nível internacional para a comunicação, nos domínios da “Documentação técnica de produtos” (TPD – “*Technical product documentation*”), da “Especificação geométrica de produtos” (GPS – “*Geometrical product specification*”), dos “Sistemas e componentes mecânicos de utilização geral”, etc.

Nesse contexto, atendendo à importância que a Normalização assume para os diversos setores económicos do País, em especial na perspetiva do Mercado Interno, em que se enquadra a atividade normativa desenvolvida nas organizações europeias, o INEGI promoveu um conjunto de iniciativas que conduziram à celebração de um “Protocolo de Cooperação no Domínio da Normalização”, com o IPQ, em 1 de julho de 1991, no quadro do Sistema Nacional de Gestão da Qualidade, através do qual o **INEGI** foi reconhecido pelo IPQ como **Organismo com funções de Normalização Setorial (ONS) nos domínios relativos ao “Desenho técnico” e aos “Elementos de ligação mecânicos”**, tratados, respetivamente, pelas Comissões Técnicas Portuguesas de Normalização: CT 1 – “Desenho técnico” (à data, extinta) e CT 9 – “Elementos de ligação mecânicos” (então desativada).

Desde então, o INEGI vem acompanhando a atividade normativa da ISO e do CEN nos domínios do “Desenho técnico” (ISO/TC 10) e dos “Elementos de ligação mecânicos” (ISO/TC 1, ISO/TC 2 e CEN/TC 185), através da elaboração de pareceres, enviados ao IPQ, sobre novos projetos de Normas ISO/DIS e prEN e suas implicações com as Normas portuguesas em vigor, nomeadamente no que respeita às Normas europeias (EN) que são adotadas como Normas portuguesas.

O ONS-INEGI passou, também, a assegurar o funcionamento das **Comissões Técnicas Portuguesas de Normalização CT 1 – “Desenho técnico”**, desde 1998, e **CT 9 – “Elementos de ligação mecânicos”**, desde 2004, constituídas por representantes de empresas e de organismos diversos e por técnicos de reconhecida competência, a título individual, que desenvolvem uma ação relevante em setores de atividade onde estes domínios encontram um largo campo de aplicação. Neste âmbito, tem elaborado projetos de versões portuguesas de Normas europeias (NP EN) e de Normas internacionais (NP ISO), que são posteriormente apresentados, às respetivas CTs, para análise e aprovação como Normas.

Num balanço rápido do trabalho já desenvolvido pelo ONS-INEGI, deve destacar-se a elaboração de 124 normas portuguesas no domínio do “Desenho técnico” (desenhos técnicos em geral, desenho de

engenharia mecânica, desenho de construção, documentação técnica de produtos e símbolos gráficos) e 168 normas portuguesas no domínio dos “Elementos de ligação mecânicos” (roscas, elementos de fixação em geral, parafusos e parafusos, porcas, anilhas, rebites e pinos) que foram posteriormente editadas pelo IPQ. A atividade desenvolvida pelo ONS-INEGI pode ser acompanhada por via da consulta da sua página (<http://www.inegi.up.pt/inegi.asp?idm=1&idsubm=23&LN=>) no sítio web do INEGI (<http://www.inegi.up.pt/>).

Com a sua participação na dinamização e difusão da atividade normativa, o INEGI tem pretendido dar uma contribuição para o apoio à consolidação do processo de internacionalização da indústria nacional. Por sua vez, a participação de docentes da SDI do DEMec – FEUP nesta atividade tem possibilitado, para além de um enriquecimento da sua formação profissional, manter uma atualização permanente dos conteúdos programáticos das várias unidades curriculares, dos cursos da FEUP, em que estes assuntos são ministrados, ao mesmo tempo que vão colaborando em cursos de formação nestes domínios, organizados pelo INEGI em empresas, o que possibilita uma troca de experiências com diversos profissionais da indústria que tem sido muito profícua para permitir ir ajustando a evolução do ensino universitário destes temas às necessidades da indústria e para o apoio a diversas atividades desenvolvidas no âmbito do INEGI.

## **2.9 O papel fundamental dos números normais na estruturação da Normalização em diferentes domínios**

### **2.9.1 Generalidades**

Nos mais variados domínios em que se torna necessário estabelecer um conjunto limitado de valores numéricos escalonados para determinadas características, tais como tamanhos lineares, áreas, volumes, trabalho, potência, velocidade, especificações de qualidade, etc., dever-se-á procurar, em cada caso, a série numérica de valores dessas características que cubra o conjunto das necessidades com um mínimo de termos (ISO 17, NP 28).

A gama de fabricação de um qualquer produto (peça, máquina, etc.) não deve ser demasiado variada nem deixada ao critério exclusivo dos diferentes fabricantes. Por exemplo, uma produção de parafusos com uma grande diversidade de diâmetros e, para cada diâmetro, com um elevado número de valores de comprimentos, daria origem a um número excessivo de variedades de parafusos, o que seria economicamente impraticável. Logo, a produção de um dado tipo de produtos deverá ser realizada com base numa gama limitada e bem determinada de variantes.

Na documentação técnica de produtos, a normalização de elementos relativos ao desenho e ao seu suporte, tais como escalas (ISO 5455), formatos de papel (ISO 216 e ISO 5457), espessuras dos traços (ISO 128-24), alturas das letras e algarismos (ISO 3098-0), baseia-se neste conceito. No sistema ISO de tolerâncias (ISO 286-1), os tamanhos nominais utilizados para o cálculo dos valores

dos graus de tolerância e dos desvios fundamentais são valores preferenciais. Na indicação dos estados de superfície (ISO 1302), os valores recomendados para a rugosidade média aritmética  $R_a$  eram também valores preferenciais.

### 2.9.2 O estabelecimento de séries de números preferenciais

Genericamente, o estabelecimento de uma série de valores numéricos preferenciais deverá ser realizado com base nas seguintes características essenciais (ISO 17, NP 28):

- ser simples e fácil de memorizar;
- ser ilimitada, nos dois sentidos dos valores numéricos;
- ser regular, incluindo os múltiplos e submúltiplos decimais de cada termo, de modo que o conjunto harmônico de números que a compõem se aplique a toda a numeração decimal;
- ser lógica, proporcionando um sistema de escalonamento racional, de modo a assegurar-se a sua estabilidade e universalidade.

Nestes termos, podem considerar-se os dois tipos de séries seguintes:

#### a) As séries aritméticas

Uma série aritmética é constituída por números em progressão aritmética (cada termo é obtido adicionando a razão da série ao termo anterior) [M5]. Por exemplo, a série de números de dentes das rodas dentadas dos trens de engrenagens dos tornos mecânicos antigos: 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, ..., 100, 105, ... é uma progressão aritmética de razão 5.

No exemplo da figura 2.7, admitindo que a gama de diâmetros dos arames de cobre era formada pela série de valores  $\varnothing 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15$ ; consta-se que enquanto o segundo termo é o dobro do primeiro, os último e penúltimo termos diferem muito pouco um do outro.

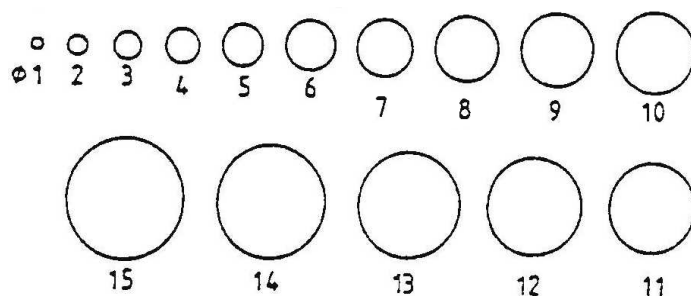


Figura 2.7 – Exemplo de uma série aritmética

Atualmente, as séries aritméticas só raramente são utilizadas na construção, pois, embora muito simples, não apresentam uma regularidade proporcional [M5].

## b) As séries geométricas

Uma série geométrica é constituída por números em progressão geométrica (cada termo é obtido multiplicando o termo anterior pela razão da série) [M5]. Por exemplo, as alturas das letras e algarismos a utilizar em desenho técnico (ver figura 2.8) devem ter valores:  $h = 1,8 \quad 2,5 \quad 3,5 \quad 5 \quad 7 \quad 10 \quad 14 \quad 20$  mm (progressão geométrica de razão 1,4).

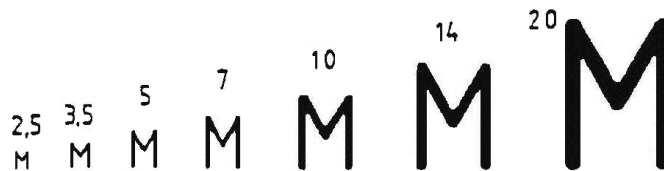


Figura 2.8 – Exemplo de uma série geométrica

Neste caso, verifica-se que há um salto regular de 40 % entre os termos sucessivos, ou seja, cada termo resulta da multiplicação do anterior pela razão 1,4. Trata-se de uma série simples, regular e lógica (os espaçamentos entre cada dois termos consecutivos são crescentes:  $3,5 - 2,5 = 1$ ;  $5 - 3,5 = 1,5$ ;  $7 - 5 = 2$ ;  $10 - 7 = 3$ ; etc.).

Na figura 2.9, pode observar-se que uma distribuição de grandezas em série de progressão geométrica resulta mais regular do que uma distribuição em série de progressão aritmética.

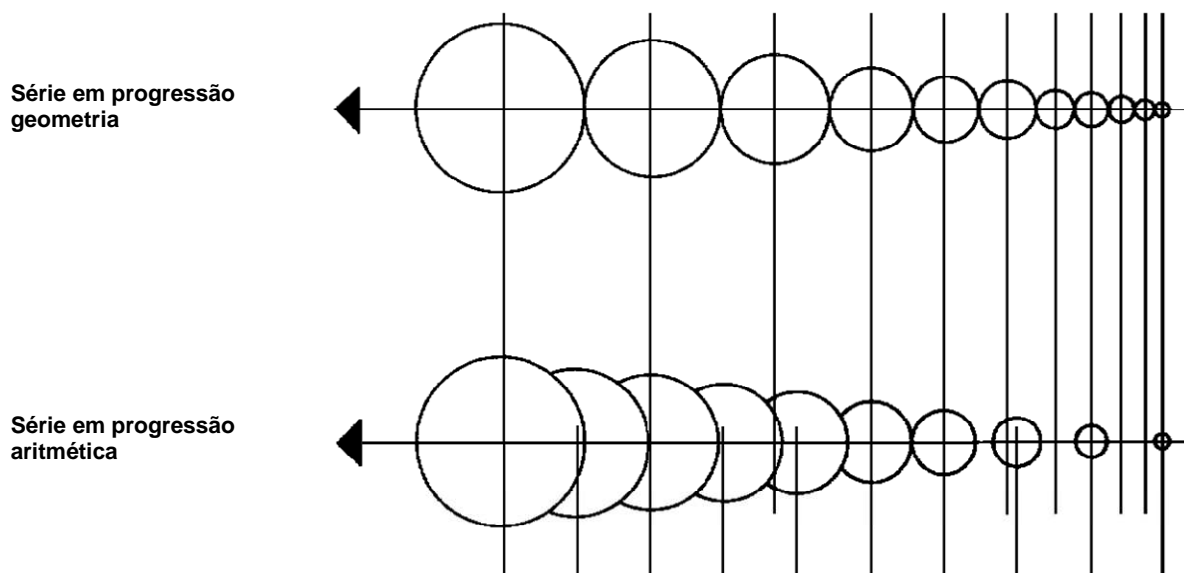


Figura 2.9 – Comparação entre condutores com diâmetros escalonados em série de progressão geométrica e em série de progressão aritmética [M3, M5]

Em face das características pretendidas e dos estudos realizados, os Organismos de Normalização optaram por séries geométricas e, de entre estas, escolheram as “Séries de números normais”, também designadas de “Séries Renard”.



### 2.9.3 Séries de números normais

Os números normais (ou preferenciais) foram utilizados pela primeira vez em França nos finais do século XIX. Entre 1877 e 1879, o Capitão Charles Renard (1847-1905), um oficial do corpo de engenheiros, fez um estudo racional dos elementos necessários para a construção de aeróstatos (ISO 17). Determinou as especificações para cabos de algodão de acordo com um sistema de escalonamento, de modo que estes elementos poderiam ser produzidos com antecedência, independentemente da aparelhagem onde iriam depois ser utilizados. Reconhecendo as vantagens da utilização de uma progressão geométrica, adotou, como base, um cabo com uma massa de  $a$  gramas por metro e, para sistema de escalonamento, uma regra que produz um valor dez vezes maior do que o valor  $a$ , após cada cinco termos da série, isto é:

$$a \times q^5 = 10a \quad \text{ou} \quad q = \sqrt[5]{10}$$

donde resultou a seguinte série numérica:

$$a \quad a\sqrt[5]{10} \quad a(\sqrt[5]{10})^2 \quad a(\sqrt[5]{10})^3 \quad a(\sqrt[5]{10})^4 \quad 10a$$

cujos valores, com 5 algarismos significativos, são:

$$a \quad 1,5849a \quad 2,5119a \quad 3,9811a \quad 6,3096a \quad 10a$$

Renard procedeu ao arredondamento destes valores, de modo a ter valores mais práticos, e adotou para  $a$  uma potência de 10, positiva, nula ou negativa, tendo obtido a seguinte série:

$$10 \quad 16 \quad 25 \quad 40 \quad 63 \quad 100$$

que pode ser prolongada em ambos os sentidos.

A partir desta série, designada pelo símbolo R 5, foram formadas as séries R 10, R 20 e R 40, em que cada nova razão adotada é a raiz quadrada da precedente:

$$\sqrt[10]{10} \quad \sqrt[20]{10} \quad \sqrt[40]{10}$$

Através deste estudo, Renard conseguiu reduzir o número de tamanhos dos cabos, até então utilizados para fins de amarração, de 425 tamanhos diferentes para apenas 17, continuando apesar disso a garantir a manutenção de uma cobertura adequada do mesmo intervalo de utilização [M5].

Os primeiros projetos de normalização, de acordo com estas bases, foram elaborados, na Alemanha, pelo DIN, em 1920, e, em França, pela Comissão permanente de normalização, em 1921. A Holanda propôs a unificação destes dois documentos, tendo sido alcançado um acordo, em 1931, e, em 1932, a ISA organizou uma reunião internacional em Milão, onde foi criado o Comité técnico ISA/TC 32, “*Preferred numbers*”. Na sequência de uma reunião do Comité técnico ISA/TC 32 realizada em Estocolmo, em 1934, a recomendação internacional foi transformada no Boletim ISA 11 (1935). Após a Segunda Guerra Mundial, a ISO retomou este trabalho com a criação do Comité técnico ISO/TC 19 “*Preferred numbers*”. Na sua primeira reunião, em Paris, em 1949, foi recomendada a adoção, pela

ISO, das séries de números normais definidas no quadro do Boletim ISA 11, isto é R 5, R 10, R 20 e R 40. Em encontros posteriores realizados em Nova York, em 1952, e em Haia, em 1953, já novamente com a presença da Alemanha, foi incluída a série R 80 e foram feitas pequenas alterações, que levaram a que o projeto viesse a dar origem à Recomendação ISO/R 3, em 1954.

### 2.9.3.1 Séries de base

As séries de base de números normais são séries geométricas com as seguintes razões:

${}^5\sqrt{10} = 1,60$ , representada por **R 5**, cuja série tem cinco termos em cada intervalo decimal.

${}^{10}\sqrt{10} = 1,25$ , representada por **R 10**, cuja série tem dez termos em cada intervalo decimal.

${}^{20}\sqrt{10} = 1,12$ , representada por **R 20**, cuja série tem vinte termos em cada intervalo decimal.

${}^{40}\sqrt{10} = 1,06$ , representada por **R 40**, cuja série tem quarenta termos em cada intervalo decimal.

${}^{80}\sqrt{10} = 1,03$ , representada por **R 80** (série excepcional).

Estas séries de base contêm o **termo “1”** e são ilimitadas nos dois sentidos; os seus valores estão indicados no quadro 2.1. Neste quadro, estão apenas representados os valores do intervalo decimal das unidades; os valores numéricos de qualquer outro intervalo decimal, maiores ou menores do que os indicados no quadro, resultam da multiplicação destes por potências de  $10^n$ , em que  $n$  é um número inteiro, positivo ou negativo.

Neste quadro, estão também indicados os valores arredondados das séries R' e R'', de uso excepcional (ISO 497).

As séries R são as séries de base de números normais; as séries R' são séries de base de números normais de 1º arredondamento, e as séries R'' são séries de base de números normais de 2º arredondamento (excepcional).

A série R 10 inclui todos os valores da série R 5.

A série R 20 inclui todos os valores da série R 10 e, portanto, também todos os da série R 5.

A série R' 40 inclui todos os valores da série R' 20 e, portanto, também todos os da série R' 10, etc.

A série R'' 20 inclui todos os valores da série R'' 10 e, portanto, também todos os da série R'' 5 (com a exceção do termo 1,5).

As séries de base de números normais podem ser séries ilimitadas nos dois sentidos ou séries limitadas num ou nos dois sentidos, conforme seguidamente se exemplifica:

R 10 (4 ...) é uma série R 10, que tem o 4 como primeiro termo e é ilimitada no sentido ascendente;

R 10 (... 125) é uma série R 10, que tem o 125 como maior termo e é ilimitada no sentido descendente;

R 5 (16 ... 250) é uma série R 5, com valores compreendidos entre 16 e 250.

Quadro 2.1 - Séries de números normais e séries arredondadas (ISO 3 e ISO 497)

Nº de Ordem	SÉRIES R 5		SÉRIES R 10			SÉRIES R 20			SÉRIES R 40	
	R 5	R'' 5	R 10	R' 10	R'' 10	R 20	R' 20	R'' 20	R 40	R' 40
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1									1,06	1,05
2						1,12	1,1	1,1	1,12	1,1
3			1,25	1,25	1,2				1,18	1,2
4						1,25	1,25	1,2	1,25	1,25
5									1,32	1,3
6						1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
7									1,5	1,5
8	1,6	1,5	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
9									1,7	1,7
10						1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
11			2	2	2				1,9	1,9
12						2	2	2	2	2
13									2,12	2,1
14						2,24	2,2	2,2	2,24	2,2
15									2,36	2,4
16	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
17									2,65	2,6
18						2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
19			3,15	3,2	3				3	3
20						3,15	3,2	3	3,15	3,2
21									3,35	3,4
22						3,55	3,6	3,5	3,55	3,6
23									3,75	3,8
24	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
25									4,25	4,2
26						4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
27			5	5	5				4,75	4,8
28						5	5	5	5	5
29									5,3	5,3
30						5,6	5,6	5,5	5,6	5,6
31									6	6
32	6,3	6	6,3	6,3	6	6,3	6,3	6	6,3	6,3
33									6,7	6,7
34						7,1	7,1	7	7,1	7,1
35			8	8	8				7,5	7,5
36						8	8	8	8	8
37									8,5	8,5
38						9	9	9	9	9
39									9,5	9,5
40	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

### 2.9.3.2 Séries derivadas

As séries derivadas são obtidas a partir das séries de base, tomando os termos destas de 2 em 2, de 3 em 3, de 4 em 4, etc., devendo ser utilizadas apenas quando nenhum dos escalonamentos das séries de base é satisfatório (ISO 3 e ISO 17).

Por exemplo, a série R 10/3 (0,025 ... 50) é constituída por valores da série R 10 tomados de 3 em 3, a partir de 0,025, ou seja:

0,025 0,05 0,1 0,2 0,4 0,8 1,6 3,15 6,3 12,5 25 50 (p. ex. a escala de valores Ra recomendados para a caracterização da rugosidade de superfície).

As séries derivadas de série R 5, tomando termos de 2 em 2, podem ter, por exemplo, a seguinte constituição:

R 5/2 (1 ... 100), com os termos: 1 2,5 6,3 16 40 100;

R 5/2 (1,6 ... 160), com os termos: 1,6 4 10 25 63 160.

### 2.9.3.3 Séries desfasadas

Uma série desfasada ("*shifted series*") é uma série com o mesmo escalonamento de uma série de base, mas que começa com um termo que não pertence a essa série, devendo ser utilizada apenas para características que são funções de outras características (ISO 17).

As séries derivadas, tomando um termo de 2 em 2 ou de 4 em 4, deverão ser séries desfasadas, isto é, formadas por termos que pertencem às séries de índice mais alto e com razões das séries de índice mais baixo. Assim, por exemplo:

R 40/4 (6 ... 30) é uma série constituída por termos da série R 40 que tem a razão da série R 10, sem conter qualquer termo desta série, ou seja: 6 7,5 9,5 11,8 15 19 23,6 30, com a razão 1,25.

### 2.9.4 Dimensões lineares preferenciais

As dimensões lineares principais (diâmetros nominais, larguras e alturas nominais, etc.) devem ser selecionadas, preferencialmente, de entre os valores da série R 5, conforme se exemplifica na figura 2.10. Quando estes valores são em número insuficiente, recorre-se, sucessivamente, aos valores das séries R 10, R 20, etc. (ISO 17).

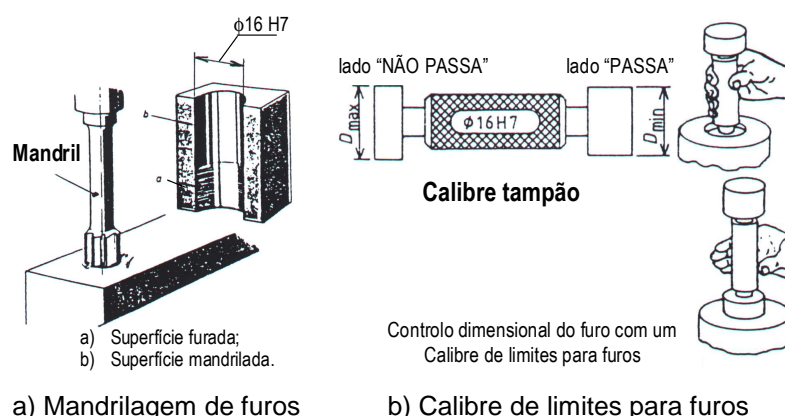


Figura 2.10 – Exemplos de aplicação de números normais na normalização de ferramentas de corte e de instrumentos de verificação

O escalonamento ótimo de valores numéricos a adotar deve ser encontrado tendo em conta duas tendências de sinal contrário. Por um lado, um escalonamento muito espaçado dá origem a um desperdício de matérias-primas. Por outro, um escalonamento apertado conduz a um aumento de

custos resultantes da necessidade de elaboração de um maior número de ferramentas, da produção de peças em séries mais pequenas, derivadas da gama de produtos ser mais alargada, e do consequente aumento das variedades em armazém.

Os números normais devem, igualmente, ser adotados para o estabelecimento de valores de resistência, massa, potência, frequência de rotação, avanço, caudal, etc.

Por sua vez, como o número  $\pi$  (3,14159...) é muito próximo do valor 3,15 da série R10, o perímetro de uma circunferência e a área de um círculo, cujo diâmetro seja um número normal, podem também ser expressos por números normais. Esta característica é também válida para as correspondentes velocidades periféricas, velocidades de corte, superfícies e volumes cilíndricos e superfícies e volumes esféricos.

Na figura 2.11, pode observar-se um exemplo de uma série de máquinas dimensionadas com base em números normais. As dimensões das máquinas maiores ou menores podem ser determinadas com facilidade, por efeito de semelhança, a partir da sucessão de valores de uma série de números normais, sem necessidade de se terem de refazer estudos e cálculos.

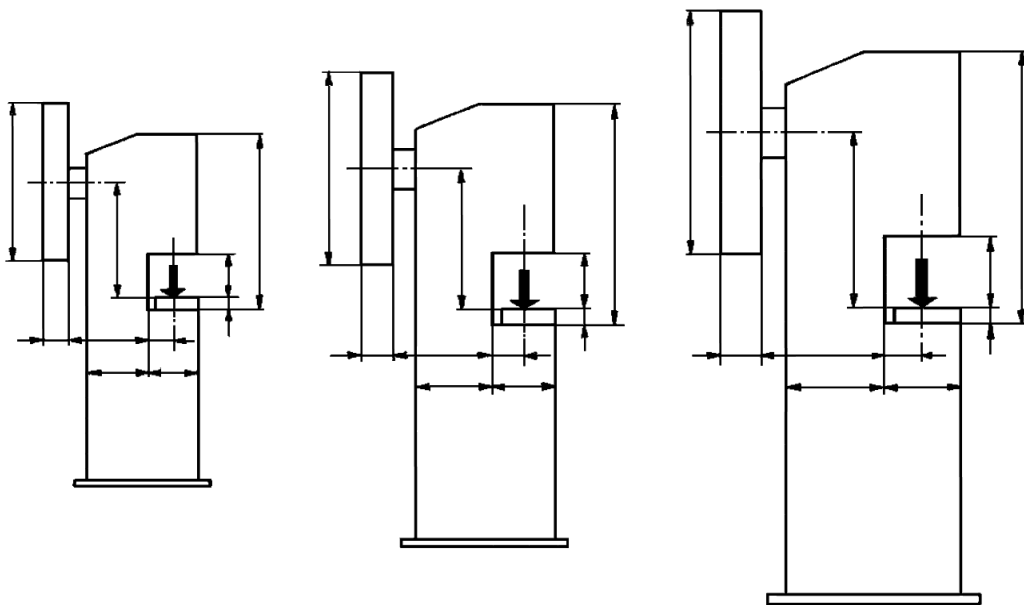


Figura 2.11 – Série de prensas mecânicas (balancés) cujas dimensões principais estão escalonadas segundo uma dada série de números normais [M3]

Só excecionalmente deverão ser utilizados valores das séries de números normais arredondados (adotar, neste caso, valores de R' como 1ª escolha e de R'' como 2ª escolha) (ISO 497). Assim, por exemplo:

- o número de dentes de uma roda dentada tem de ser um número inteiro; logo deve adotar-se 32 em vez de 31,5;
- os semiprodutos (barras, laminados, etc.) devem apresentar dimensões lineares ligeiramente superiores às normais, para que, após as operações de trabalho mecânico, o produto acabado

apresente dimensões com valores que são números normais, sem haver grande desperdício de material.

### 2.9.4.1 Exemplos de aplicação

A título de exemplo podem assinalar-se alguns casos relevantes da utilização dos números normais na normalização das características de produtos, máquinas, equipamentos, etc.:

- A gama normalizada de frequências de rotação nominais dos motores elétricos assíncronos é constituída por valores da série R 40 [375, (500), (600), 750, (1000), 1500 e 3000  $\text{rot}\cdot\text{min}^{-1}$ ].
- As frequências de rotação das árvores e os avanços normalizados das máquinas-ferramenta são valores da série R 20.
- Os diâmetros dos condutores elétricos de cobre estão normalizados com base em valores da série R 40.
- As frequências de rotação dos motoredutores estão normalizadas com base em valores da série R 20.
- As quatro séries de alturas das pontas de veio das máquinas rotativas são constituídas por valores das séries R 5, R 10, R 20 e R 40.
- As espessuras dos papéis estão normalizadas com base em valores da série R 20.
- As espessuras das linhas utilizadas em desenho técnico estão normalizadas com base em valores da série R 20.

Na referência [K2], mostram-se algumas das vantagens da utilização de números preferenciais na normalização de características de produtos definidas no sistema métrico, tais como diâmetros de roscas, tamanhos de chapas de aço, barras, ferramentas, etc., em termos de racionalização da produção, derivada da redução do número de variantes disponíveis para a satisfação das necessidades correntes do mercado, em comparação com as séries de valores utilizados na caracterização de produtos idênticos, disponíveis nos USA, mas concebidos em polegadas.

## 2.10 Considerações finais

Desde a Antiguidade que existem registos de ações tendentes a definir, unificar e simplificar (ou seja, normalizar) produtos acabados e elementos utilizados na sua produção. No século XX, as primeiras atividades normativas de âmbito internacional, que começaram a ser desenvolvidas ainda na parte final da década de 20, atribuíram particular importância à engenharia mecânica, mas também ao desenho técnico, às tolerâncias e ajustamentos e aos estados de superfície, que são matérias fundamentais no contexto da documentação técnica e da especificação geométrica de produtos.

Atualmente, com o avanço da liberalização do comércio mundial e a interpenetração dos vários setores industriais, os trabalhos de normalização sobre assuntos de interesse mundial são, normalmente, desenvolvidos sob a direção da ISO e acompanhados no âmbito do CEN, quando apresentam interesse para a Normalização europeia. As normas elaboradas a este nível são, posteriormente, adotadas como normas nacionais, pelos respetivos Organismos Nacionais de Normalização (ONN) e, finalmente, consagradas nos procedimentos internos dos diferentes setores industriais e das empresas.

A Documentação técnica e a Especificação e verificação geométricas de produtos são exemplos relevantes de domínios estudados, no seio da ISO, de modo a poderem vir a ser postos ao serviço da economia e da engenharia mundiais, nomeadamente no apoio ao desenvolvimento de produtos. Em Portugal, o ONS-INEGI tem coordenado a elaboração das normas portuguesas, NP EN ISO e NP ISO, nos domínios do “Desenho técnico” e dos “Elementos de ligação mecânicos” que posteriormente são editadas pelo IPQ.

No contexto da atividade normativa, deve ser feita uma referência particular ao papel fundamental desempenhado pela utilização dos números preferenciais (números normais) na normalização de características de produtos e na racionalização da produção, derivada da redução do número de variantes disponíveis para a satisfação das necessidades correntes do mercado. Este conceito tem um campo de aplicação significativo ao nível da documentação técnica de produtos (TPD) e da especificação geométrica de produtos (GPS).

Finalmente, na figura 2.12, apresentam-se alguns dos principais objetivos da Normalização internacional para o século XXI.

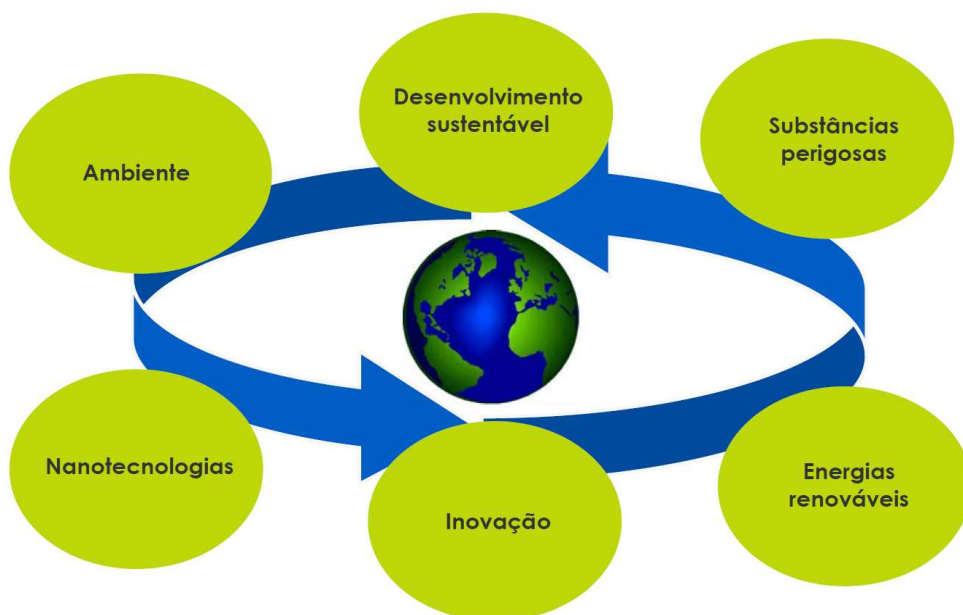


Figura 2.12 – Os grandes objetivos da Normalização internacional para o século XXI [M4]

A “Inovação” e as “Nanotecnologias” são exemplos de setores de atividade que têm dado origem ao desenvolvimento de trabalhos de âmbito normativo, ao nível da ISO, significativos nos domínios da documentação técnica de produtos (TPD) e da especificação geométrica de produtos (GPS), podendo referir-se, a título de exemplo, os documentos normativos ISO 17599 – “*General requirements of digital mock-up for mechanical products*”, ISO/CD 8887-1 – “*Design and documentation for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE)*”, ISO/DIS 1101.2 – “*Geometrical tolerancing*”, ISO 25178 (series) – “*Surface texture: Areal*”, ISO 16610 (series) – “*Filtration*”, etc.

## 2.11 Referências

- [K1] – KUERT, W. – *The Founding of ISO – “Things are going the right way!”*. In *Friendship Among Equals – Recollections from ISO's first fifty years* [Em linha]. Switzerland: ISO, 1997, p. 15-21. ISBN 92-67-10260-5. [Consult. 2 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.iso.org/iso/2012\\_friendship\\_among\\_equals.pdf](http://www.iso.org/iso/2012_friendship_among_equals.pdf)>.
- [K2] – KVERNELAND, K. O. – *Metric Standards for Worldwide Manufacturing* [Em linha]. 2012 Electronic 8 th Edition. GO metricUSA™.org, Inc., Statesville, North Carolina, USA, 2012. ISBN 0-9744477-7-3 (e-book). [Consult. 2 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.metric-bsp.com/METRIC%20STANDARDS%20for%20Worldwide%20Manufacturing%20summaries.pdf>>.
- [M1] – MACHADO JORGE, H. – *Metrologia, Método e Arte da Medição*. Lisboa: IPQ, 1993.
- [M2] – MANFÈ, G.; POZZA, R.; SCARATO, G. – *Desenho Técnico Mecânico*. S. Paulo: Hemus-Livraria Edit. Ltda, vol 1, 1977.
- [M3] – MANFÈ, G.; POZZA, R.; SCARATO, G. – *Desenho Técnico Mecânico*. S. Paulo: Hemus-Livraria Edit. Ltda, vol 3, 1977.
- [M4] – *Manual de Normalização 2009* [Em linha]. Departamento de Normalização do IPQ. Lisboa: IPQ, 2009. [Consult. 31 out. 2013]. Disponível em WWW:<URL:[http://www1.ipq.pt/PT/ProjectoJuventude/site/Manual\\_Normalizacao.pdf](http://www1.ipq.pt/PT/ProjectoJuventude/site/Manual_Normalizacao.pdf)>.
- [M5] – MILTON, H. J. – *The Selection of Preferred Metric Values for Design and Construction* [Em linha]. NBS Technical Note 990. Washington D.C.: National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, 1978. 88 p. [Consult. 2 mai. 2015]. Disponível em WWW:<URL:<http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote990.pdf>>.
- [M6] – *My ISO Job. Guidance for delegates and experts* [Em linha]. Genève: ISO Central Secretariat. 2005. 21 p. [Consult. 31 out. 2013]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.iso.org/iso/my\\_iso\\_job.pdf](http://www.iso.org/iso/my_iso_job.pdf)>.
- [N1] – NICOLAS, F.; REPUSSARD, J. – *Normas comuns para as empresas*. Luxemburgo: S.P.O. das Comunidades Europeias. 1995. 275 p.
- [S1] – SIMÕES MORAIS, J. M. – *Desenho Básico*. Desenho de Construções – 1. 26ª ed. Porto: Porto Editora, 1999.
- [R1] – RUSSELL, A. – *Standardization in History: A Review Essay with an Eye to the Future* [Em linha]. In Sherrie Bolin, ed., *The Standards Edge: Future Generations*. Ann Arbor, MI, USA: Sheridan Press. 2005, p. 247-260. ISBN 0-9748648-3-8. [Consult. 15 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://arussell.org/papers/futuregeneration-russell.pdf>>.



[V1] – VEIGA DA CUNHA, L. – *Desenho Técnico*. Lisboa: F.C. Gulbenkian. 11ª edição. 1999.

### 2.11.1 Normalização

CEN/CENELEC Internal Regulations. Part 2: Common Rules for Standardization Work, 2013 [Em linha]. [Consult. 15 out. 2013]. Disponível em WWW:<URL:[http://boss.cen.eu/ref/IR2\\_E.pdf](http://boss.cen.eu/ref/IR2_E.pdf)>.

EN ISO/IEC 17000 (series)	– Conformity assessment. CEN [série NP EN ISO/IEC 17000 IDT].
ISO 3:1973	– Preferred numbers – Series of preferred numbers. ISO.
ISO 17:1973	– Guide to the use of preferred numbers and of series of preferred numbers. ISO.
ISO 128-4:2014	– Technical drawings – General principles of presentation – Part 24: Lines on mechanical engineering drawings. ISO.
ISO 216:2007	– Writing paper and certain classes of printed matter -- Trimmed sizes – A and B series, and indication of machine direction. ISO.
ISO 286-1:2010+Cor.1:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. ISO.
ISO 497:1973	– Guide to the choice of series of preferred numbers and of series containing more rounded values of preferred numbers. ISO.
ISO/DIS 1101.2:2015	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
ISO 1302:2002	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation. ISO.
ISO 3098-0:1997	– Technical product documentation – Lettering – Part 0: General requirements. ISO.
ISO 5455:1979	– Technical drawings – Scales. ISO.
ISO 5457:1979+A 1:2010	– Technical product documentation – Sizes and layout of drawing sheets. ISO.
ISO/CD 8887-1	– Design and documentation for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE) – Part 1: General concepts, process and requirements. ISO.
ISO 9000 (series)	– Quality management systems. ISO [série NP EN ISO 9000 IDT].
ISO 16610 (series)	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration. ISO.
ISO 17599:2015	– Technical product documentation (TPD) – General requirements of digital mock-up for mechanical products. ISO.
ISO 25178 (series)	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal. ISO.
NP 28:1961	– Números normais. IPQ.
NP EN 45020:2009	– Normalização e actividades correlacionadas. Vocabulário geral (Guia ISO/IEC 2:2004).



## **CAPÍTULO 3**

**A documentação e a especificação técnicas de produtos adequadas ao mercado global no domínio da engenharia mecânica**



## Capítulo 3

# A documentação e a especificação técnicas de produtos adequadas ao mercado global no domínio da engenharia mecânica

### 3.1 Introdução

Com o objetivo de promover uma melhor comunicação entre projetistas e fabricantes, num mercado global com as características já descritas, no capítulo 1 deste trabalho, a Organização Internacional de Normalização (ISO) está a desenvolver novos conceitos no domínio da **Especificação técnica de produtos – TPS** (“*Technical product specification*”), ver o ISO/TR 23605 e [A1].

A especificação técnica de produtos é o conjunto de documentos técnicos que abrange a definição de conceção e a especificação completas de um produto, para fins de fabricação e verificação. Pode ser constituída por um ou mais documentos técnicos, englobando **desenhos, modelos 3D, listas de peças** ou outros documentos que sejam parte integrante da especificação, qualquer que seja o formato em que se apresentem.

O estabelecimento dos requisitos normativos, necessários à preparação de especificações técnicas para as diferentes fases do processo de desenvolvimento dos produtos, assenta em dois grandes conceitos desenvolvidos pela ISO: a “Documentação técnica de produtos” e a “Especificação geométrica de produtos”.

A **Documentação técnica de produtos – TPD** (“*Technical product documentation*”) é o conjunto de meios de comunicação da totalidade ou de parte de uma definição de conceção ou especificação de um produto, para fins de fabricação e verificação. É o domínio de trabalho do Comité técnico **ISO/TC 10** que engloba regras de desenho e de documentação; gestão de informação técnica de produtos; modelação de produtos; classificação de documentos, sistemas, etc.; terminologia; simbologia e suportes e equipamento para desenhos, cobrindo as necessidades técnicas existentes ao longo do ciclo de vida dos produtos [B6].

Para além dos tradicionais desenhos de engenharia, que estiveram na origem da sua criação, em 1947, o ISO/TC 10 debruça-se sobre a apresentação de todas as formas de especificação para produtos técnicos, qualquer que seja o meio escolhido para suporte da especificação, nomeadamente a representação gráfica e as anotações dos dados de definição de produtos gerados nos atuais sistemas de CAD 3D.

A **Especificação geométrica de produtos – GPS** (“*Geometrical product specification*”) é um sistema internacionalmente aceite (ISO 14638) utilizado para definir os requisitos geométricos de peças em especificações de engenharia, bem como os requisitos para a sua verificação, durante alguns dos diferentes estádios do seu ciclo de vida. Este conceito pode ser expresso, de um modo mais simples, como o conjunto de requisitos que especificam a macro e a microgeometria de um produto (peça), associado com requisitos para a verificação e a calibração dos respetivos instrumentos de medição [B7]. É o domínio de trabalho do Comité técnico **ISO/TC 213**, cujo objetivo principal é o desenvolvimento e a promoção de um sistema integrado para a especificação e verificação da geometria das peças, que possa funcionar como uma ferramenta importante de engenharia no desenvolvimento e fabricação de produtos.

Na figura 3.1, apresentam-se, dois exemplos de especificações técnicas de produtos, englobando a definição da geometria nominal, dimensões, tolerâncias, notas, texto e/ou símbolos, etc. de tipos diferentes: a) um desenho de definição de uma peça em representação ortográfica [B3]; b) um modelo 3D de conceção anotado (ISO 16792).

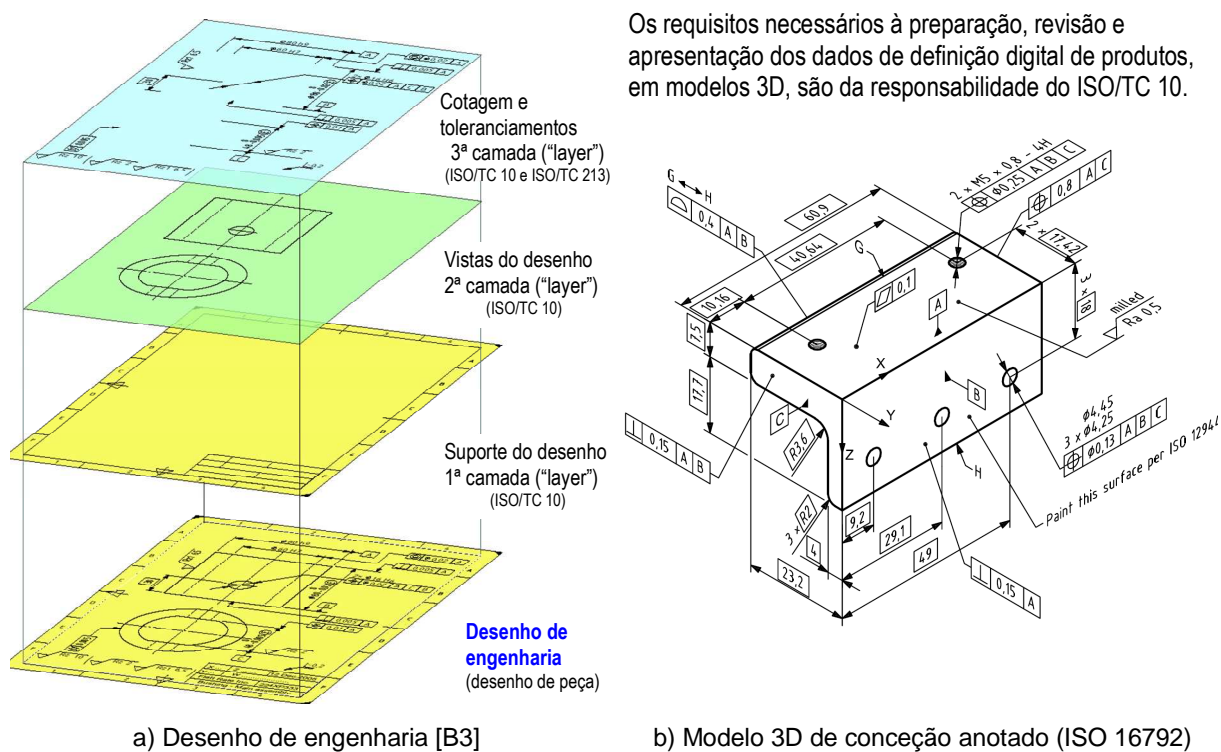


Figura 3.1 – Exemplos de especificações técnicas de produtos

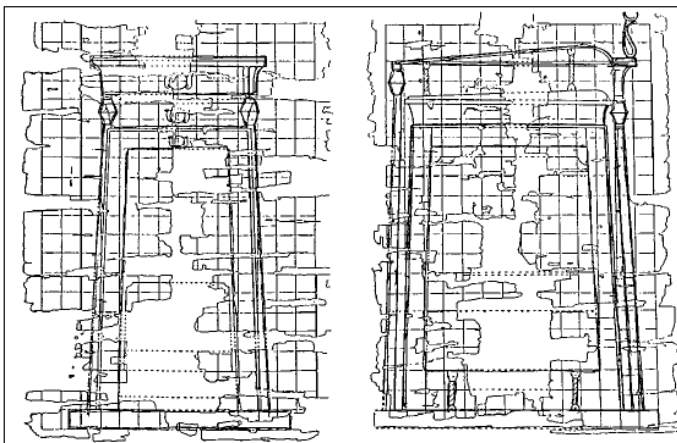
Nas secções seguintes deste capítulo, muito centrado na Documentação técnica, começa-se por oferecer uma visão geral sobre a evolução da representação gráfica em engenharia; em seguida, expõem-se as bases para a definição do modelo internacional, proposto pela ISO, com vista ao estabelecimento dos requisitos para a preparação de todas as formas de especificação técnica de produtos e, finalmente, apresentam-se alguns exemplos de aplicação de conceitos de Documentação técnica nas diferentes atividades do processo de desenvolvimento de produtos.

### 3.2 Visão geral sobre a evolução da representação gráfica em engenharia

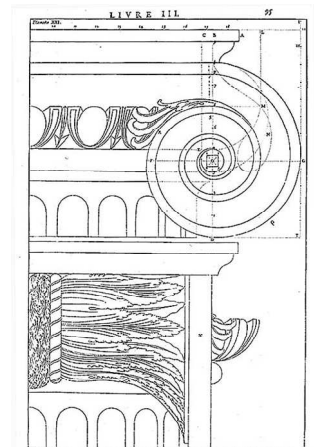
O **Desenho técnico** tem desempenhado um papel assinalável no desenvolvimento científico e tecnológico da humanidade, desde a Antiguidade oriental até à atualidade. Na Antiguidade, os primeiros desenhos eram representações ortográficas mais ou menos rudimentares, podendo referenciar-se como **suportes de escrita e dos desenhos técnicos**, entre outros, as placas de argila (a partir do 4º milénio a.C.), os papiros (após 2500 a.C.) e, finalmente, os pergaminhos (desde o século III a.C.) que se tornaram o principal material de escrita, na Europa, a partir do séc. IV d.C. (ver exemplos na figura 3.2).



a) Planta de templo caldeu (2130 a.C.) desenhada numa placa de argila



b) Duas vistas de santuário móvel egípcio (cerca de 1500 a.C.) traçadas em papiros



c) Capitel jónico (séc. I a.C.) desenhado em pergaminho

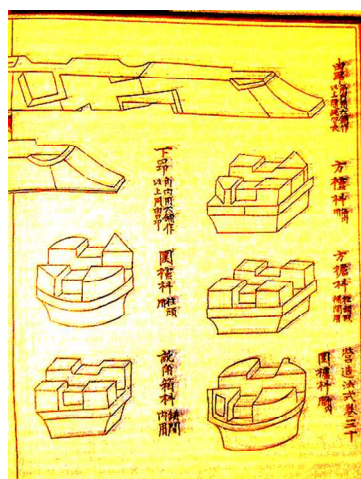
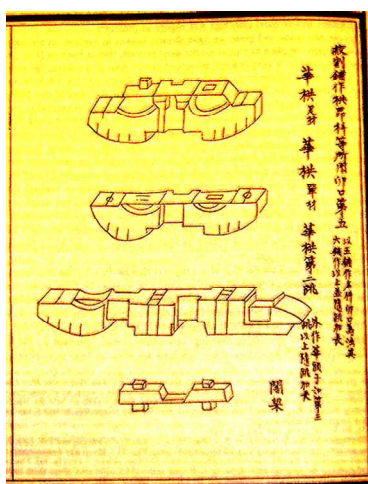
Figura 3.2 – Exemplos de desenhos técnicos nas Antiguidades oriental e clássica [B1, H1]

A partir do séc. V a.C., os gregos desenvolveram estudos nos domínios da geometria e da ótica que conduziram à realização de representações onde se procurava atingir um certo realismo tridimensional por meio da introdução de um efeito de profundidade, obtido através da inclusão de noções de perspetiva (projeção central), que estão na base da tradição pictórica ocidental. Neste

âmbito, podem assinalar-se, entre outros, os tratados produzidos por Euclides de Alexandria (séc. III a.C.), intitulados “*Elementos*” (c. 300 a.C.) e “*Óptica*” (295 a.C.), e os trabalhos realizados posteriormente por Cláudio Ptolomeu (90-168) sobre ótica e geografia. Por sua vez, as técnicas tradicionais de representação e pintura sino-japonesas, baseadas em noções de projeção paralela, permaneceram praticamente inalteradas até ao séc. XIX [M2] (ver exemplos na figura 3.3).



a) Representação em perspetiva de um frontão, Grécia, séc. IV a.C.



b) Desenhos de entalhes em peças de madeira, em representação perspetiva cavaleira, do livro *Yingzao Fashi* de Li Jie, China, 1103

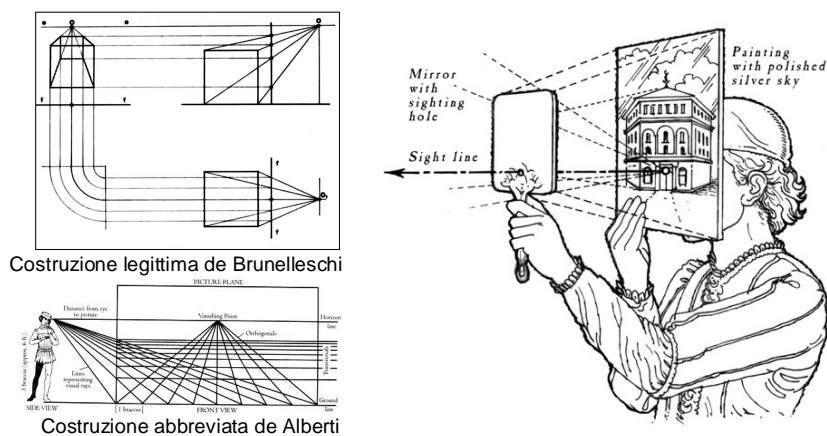
Figura 3.3 – Exemplos de representações perspetivas, na Grécia antiga e na China [M2]

No entanto, mais tarde, até à parte final da Idade média, subsistiram muitas dificuldades na representação rigorosa de objetos tridimensionais em superfícies planas, uma vez que muitos daqueles conhecimentos tinham sido esquecidos. Deve também assinalar-se que, do séc. XIII em diante, o **papel** começou a generalizar-se como suporte de escrita e de desenho.

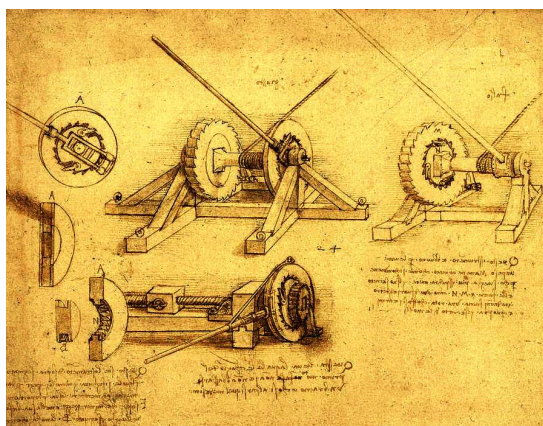
Só no século XV é que se começaram a registar progressos significativos no desenvolvimento dos métodos de representação gráfica [C3]. Filippo Brunelleschi (1377-1446), em 1413, estabeleceu pela primeira vez as leis geométricas da **perspetiva linear**, baseando-se em noções já conhecidas desde a Grécia antiga e que entretanto tinham sido recuperadas. Leon Battista Alberti (1404-1472), em



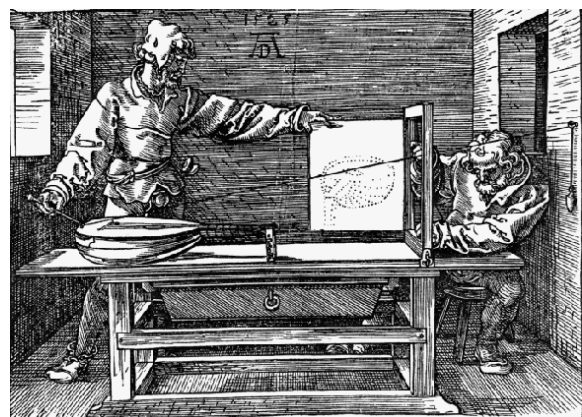
1435, publicou “*De Pictura*”, o primeiro tratado sobre perspectiva. Piero della Francesca (1415-1492), em 1475, escreveu “*De Prospectiva Pingendi*” (Da perspectiva em pintura), o primeiro tratado onde foi feita uma sistematização dos conceitos sobre perspectiva. Leonardo da Vinci (1452-1519) realizou alguns estudos experimentais que contribuíram de forma significativa para o entendimento da perspectiva linear e produziu vários desenhos arquitetônicos e de máquinas em perspectiva, em que o ponto de fuga se afasta cada vez mais do centro da folha de desenho, o observador “sobe” em relação ao objeto e afasta-se deste, daí resultando representações perspéticas que são “quase” axonometrias cavaleiras. Albrecht Dürer (1471-1528) elaborou o tratado de geometria “*Unterweisung der Messung mit dem Zirkel und Richtscheit*” (*Instrução da medição com o compasso e a régua*) que começou a ser publicado em 1525, em 4 livros, e contém gravuras que ilustram bem a procura científico-empírica das regras que permitiriam uma representação rigorosa de objetos 3D, em desenhos 2D em perspectiva [M1, M2] (ver figura 3.4).



a) O princípio da demonstração de Brunelleschi (1413)



b) Leonardo da Vinci: desenho perspético de catapulta



c) Albrecht Dürer: construção da imagem de um alaúde, em perspectiva (xilografia, 1525)

Figura 3.4 – Exemplos de métodos de representação em perspectiva desenvolvidos no Renascimento

Posteriormente, Girard Desargues (1591-1661) explorou as construções da perspectiva (projeção cônica) para estudar as propriedades das cónicas (elipse, parábola, hipérbole), no tratado “*Brouillon projet d'une atteinte aux événements des rencontres du cône avec un plan*” (Esboço tosco de uma tentativa de tratar os resultados dos encontros do cone com um plano), publicado em 1639, que está

na base da atual **geometria projetiva** (estudo das propriedades descritivas das figuras geométricas). Nos seus estudos, desenvolveu o conceito de pontos no infinito (pontos impróprios) e um sistema de retas paralelas passou a ser entendido como um caso particular de um sistema de retas concorrentes. Mais tarde, esses conceitos viriam a ser retomados e desenvolvidos por Jean-Victor Poncelet (1788-1867) que publicou, em 1822, o “*Traité des propriétés projectives des figures*”.

O matemático inglês Brook Taylor (1685-1731) publicou, em 1715, a obra “*Linear Perspective*” onde desenvolveu e organizou, num todo coerente, os conceitos sobre as projeções centrais ou cônicas. Em 1749, esse tratado foi ampliado por John Colson (1680-1760), com o novo título de “*New Principles of Linear Perspective*”. Finalmente, no século XIX, estes conhecimentos foram sistematizados por Guillaume H. Dufour (1787-1875), em 1827, na obra “*Géométrie perspective, avec ses applications à la recherche des ombres*”, e por Barthélémy E. Cousinery (1790-1851), em 1828, no tratado intitulado “*Géométrie perspective, ou principes de projection polaire appliqués à la description des corps*”, de modo a constituírem um método geral de representação na resolução dos problemas de Geometria do espaço [G1].

Atualmente, as regras de base recomendadas, a nível internacional, para o desenvolvimento e aplicação da projeção central (ou cônica), em desenhos técnicos, estão especificadas na norma ISO 5456-4 – “*Technical drawings – Projection methods – Central projection*”.

Por sua vez, apenas no final do século XVIII, Gaspard Monge (1746-1818), baseado em conhecimentos e técnicas pré-existentes, desenvolveu e sistematizou um método de projeção simultânea de um dado objeto em dois planos de projeção ortogonais – o **método diédrico** ou **método da dupla projeção** – que publicou no seu tratado de “*Géométrie Descriptive*”, editado em 1798/99, em resultado das Lições dadas nas “*Écoles Normales*”, em Paris (1794/95), estabelecendo assim as bases do Desenho técnico moderno.

Com este método, passou a ser possível representar a forma de qualquer objeto do espaço suscetível de definição rigorosa e as suas dimensões reais, bem como resolver qualquer problema relativo a esse objeto, num suporte bidimensional, por posterior rotação de um dos planos de projeção sobre o outro (ver um exemplo desta técnica, na figura 3.5). A validade dos processos que permitem passar os problemas da geometria no espaço para figuras planas, sem a necessidade da realização de cálculos fastidiosos, é comprovada pela correspondência biunívoca entre as duas formas: a figura plana deverá permitir reconstruir a figura no espaço.

Por outro lado, o antagonismo registado entre a França e a Grã-Bretanha, na primeira metade do século XIX, levou a que o método de Monge não tivesse tido então grande penetração neste último país, tendo sido dada preferência ao desenvolvimento de métodos de representação gráfica que permitissem aos trabalhadores ingleses dispor de desenhos simples e fáceis de interpretar, que lhes assegurassem a informação necessária para a construção, montagem e desmontagem dos sistemas mecânicos produzidos nas fábricas, em plena época de Revolução industrial. Esta via levou ao

desenvolvimento e à sistematização das **Representações axonométricas**, cujas origens remontam à tradição pictórica oriental sino-japonesa, que, desde o século XV, já vinham a ser utilizadas em desenhos, nos domínios da arquitetura militar e da construção mecânica.

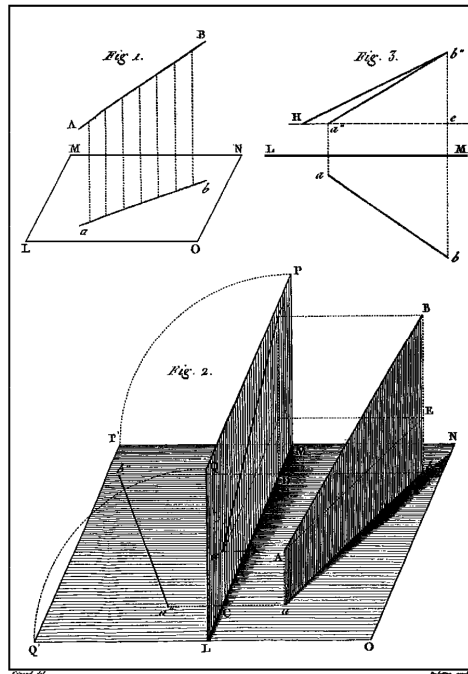
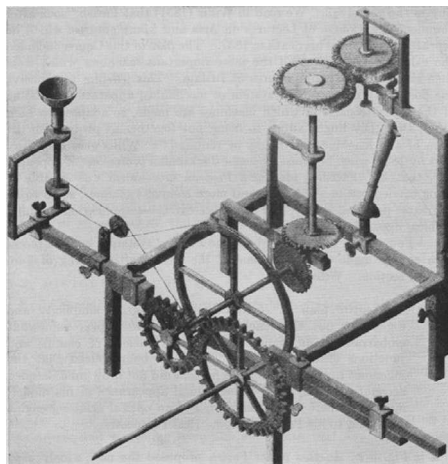


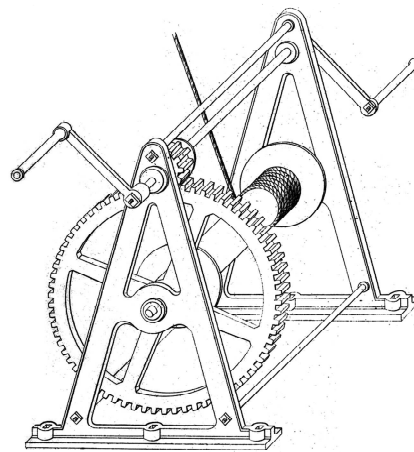
Figura 3.5 – G. Monge (1794): Método diédrico – exemplo da dupla projeção ortogonal de um segmento de reta com rebatimento do plano vertical [B5]

Neste âmbito, em 1822, W. Farish (1759-1837) publicou um trabalho intitulado “*On isometrical Perspective*” com objetivos eminentemente práticos. J. L. Weisbach (1806-1871) foi o responsável pela generalização do método de Farish à axonometria ortogonal em geral, através do artigo “*Die monodimetrische und axonometrische Projektionsmethode (Perspective)*” publicado em 1844. A palavra **Axonometria** [do grego, *áxon* (eixo) + *métron* (medida)] aparece pela primeira vez na obra “*Lehrbuch der axonometrischen Projektionslehre*” (Manual de ensino da projeção axonométrica) publicada pelos irmãos M. H. e C. Th. Meyer, em 1852. Karl Pohlke (1810-1876) formulou, em 1853, o teorema fundamental da axonometria oblíqua que foi, posteriormente, demonstrado e generalizado por H. Schwarz (1843-1921), em 1864 [M2] [ver exemplos destas técnicas nas figuras 3.6 a) e b)].

Uma vez que as representações axonométricas não permitem uma reprodução inequívoca de todos os pormenores de um dado objeto espacial, a partir da segunda metade do século XIX, estas representações deixaram de ser consideradas como fontes primárias da definição e da fabricação de produtos. No entanto, atualmente, as **representações axonométricas** continuam a ser muito utilizadas como **representações perspéticas** (imagens tridimensionais dos objetos), na fase de estudo conceptual do processo de desenvolvimento de produtos, como meio fácil de comunicação técnica e como meio auxiliar para a interpretação de desenhos de definição e de fabricação de produtos em representação ortográfica (multivistas), em domínios tais como engenharia, arquitetura, design, etc.



a) W. Farish (1822): Representação isométrica de um "Optical-grinding engine model"



b) M. e C. Meyer (1855-63): Representação axonométrica oblíqua de um carretel

Figura 3.6 – Exemplos de aplicação de representações axonométricas

As regras de base recomendadas para a aplicação das representações axonométricas, em todos os tipos de desenhos técnicos, a nível internacional, estão especificadas na norma ISO 5456-3 – “*Technical drawings – Projection methods – Axonometric representations*”. Com o desenvolvimento dos sistemas de CAD e da computação gráfica em geral, a axonometria tornou-se também um meio privilegiado de interface visual dos sistemas com os utilizadores, em particular nos sistemas de CAD de modelação tridimensional. Para além dos autores citados, muitos outros contribuíram também para o desenvolvimento e sistematização dos métodos de representação gráfica [M1, M2].

Nos primórdios da Revolução industrial, a disposição relativa das vistas de um dado produto, na folha de um desenho técnico primitivo, elaborado em representação ortográfica, era ditada fundamentalmente por meras questões de conveniência da sua execução e apenas se dava importância ao alinhamento entre as vistas, de modo a facilitar o traçado de alguns dos seus elementos geométricos (ver figura 3.7).

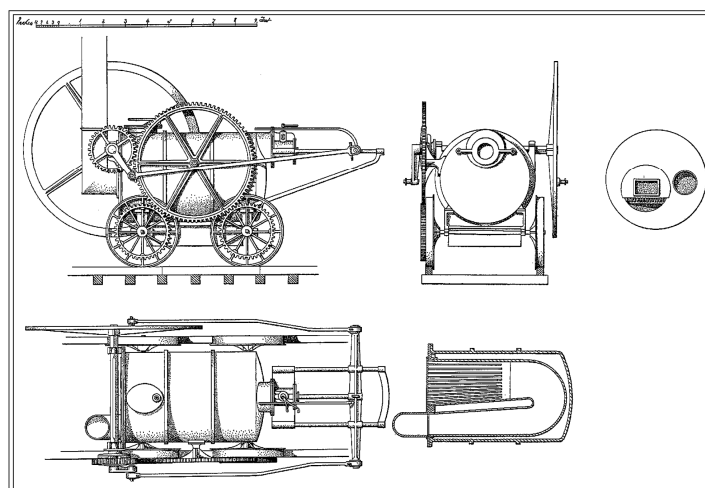


Figura 3.7 – Desenho da locomotiva Newcastle (1804), elaborado por Richard Trevithick e existente no Museu da Ciência, em Londres [B5]

No exemplo apresentado na figura 3.7, a vista de cima está representada por debaixo da vista de frente, de acordo com o método de projeção proposto por Gaspard Monge, mas a vista da direita aparece projetada à direita, contrariando o referido método. No entanto, este desenho é significativo pois documenta dois procedimentos diferentes que viriam a estar na base dos dois métodos de representação ortográfica mais relevantes, no Desenho técnico do século XX.

O Desenho técnico moderno tem por base os conceitos desenvolvidos por Gaspar Monge, no seu tratado de “*Géométrie Descriptive*”, que passaram a permitir resolver, graficamente e de modo inequívoco, todos os problemas espaciais utilizando, em simultâneo, dois planos de projeção [G2 e S6] (figura 3.8).

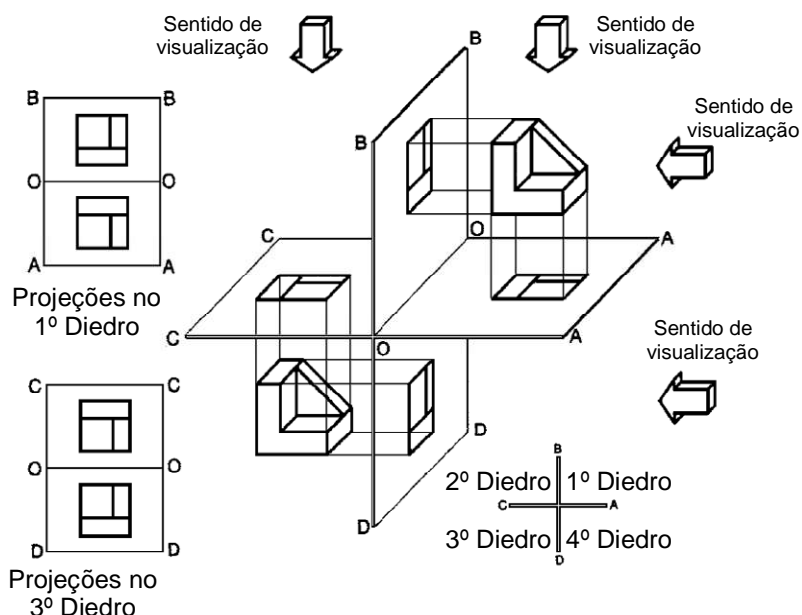


Figura 3.8 – Método de Monge, método diédrico ou da dupla projeção. Adaptada de [G2]

Posteriormente, o matemático italiano Gino Loria (1862-1954) promoveu a utilização de um 3º plano de projeção na Geometria Descritiva e o Desenho técnico generalizou este conceito, admitindo a possibilidade da utilização simultânea de 6 planos de projeção perpendiculares e/ou paralelos entre si. De início, pareceu ser consensual a adoção, em Desenho técnico, de uma disposição das diferentes vistas de um dado produto baseada na Geometria descritiva de Monge, dando origem ao atualmente designado Método de projeção do 1º diedro, que é utilizado na maioria dos países do mundo (ver figuras 3.8 e 3.9).

No entanto, nos USA, para onde tinha convergido gente das mais variadas proveniências e com tradições culturais e educacionais diversificadas, a partir das últimas décadas do século XIX, começaram a discutir-se as eventuais vantagens da utilização, em desenho, de um método com uma disposição diferente das vistas, considerada mais intuitiva [M3], na qual, definida a vista de frente do objeto, as restantes vistas eram representadas nos lados a partir dos quais esse objeto tinha sido

observado, procurando ao mesmo tempo estabelecer-se um modelo físico que permitisse unificar estes dois métodos em confronto, explicando-os em termos de projeções em planos.

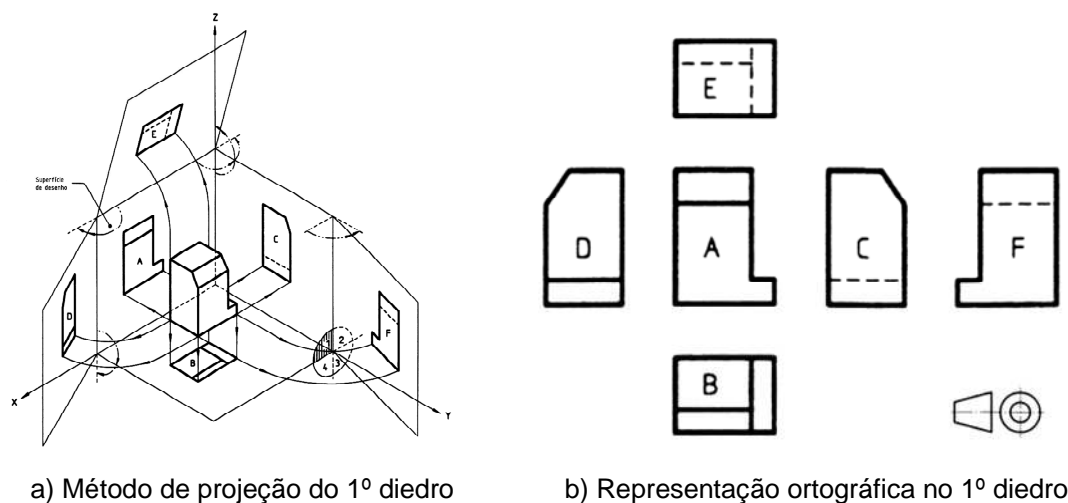


Figura 3.9 – A representação ortográfica segundo o Método de projeção do 1º diedro (ISO 5456-2)

O modelo invocado para o efeito foi a designada “*glass box*” que esteve na base da explicação do atualmente designado Método de projeção do 3º diedro (ver figuras 3.8 e 3.10), que passou a ser adotado como prática corrente, nos USA, por volta da I Guerra mundial, sendo presentemente muito utilizado nos países anglo-saxónicos com fortes relações comerciais com os USA [B5, M3].

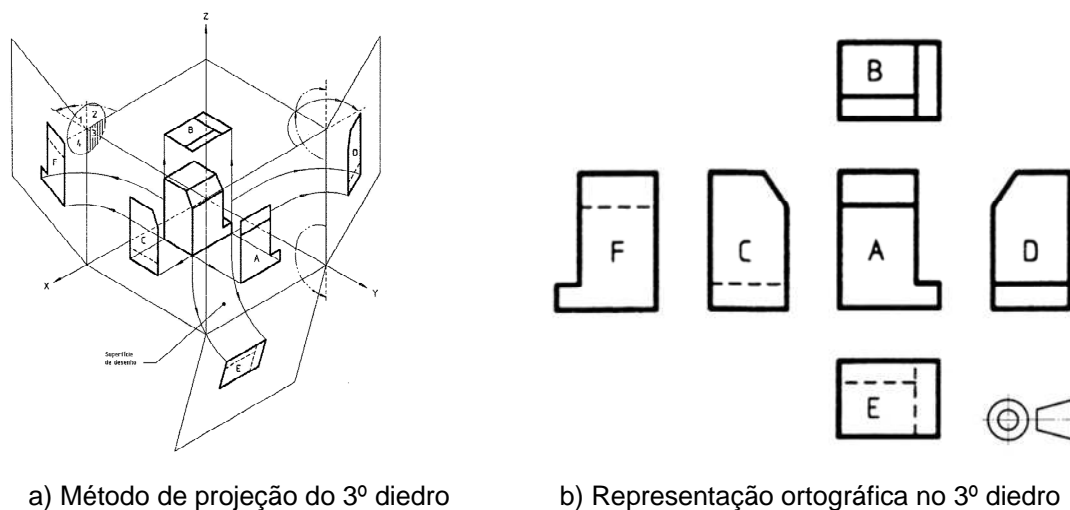
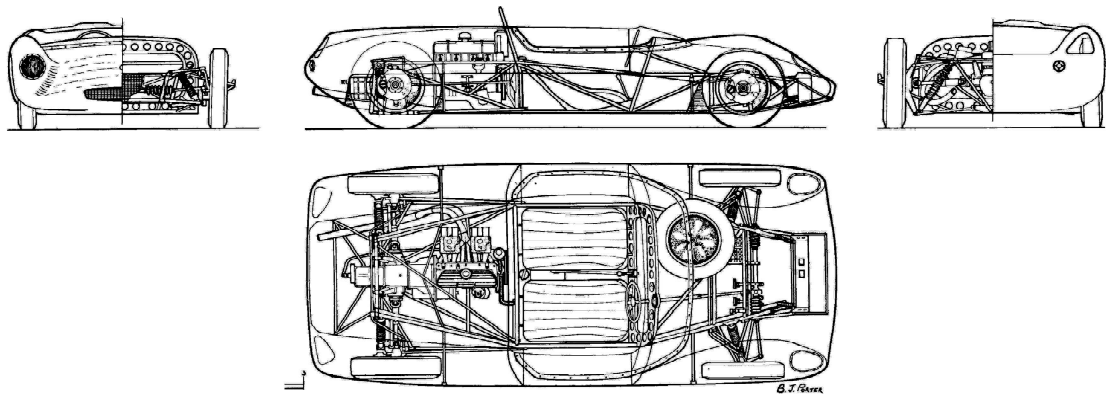


Figura 3.10 – A representação ortográfica segundo o Método de projeção do 3º diedro (ISO 5456-2)

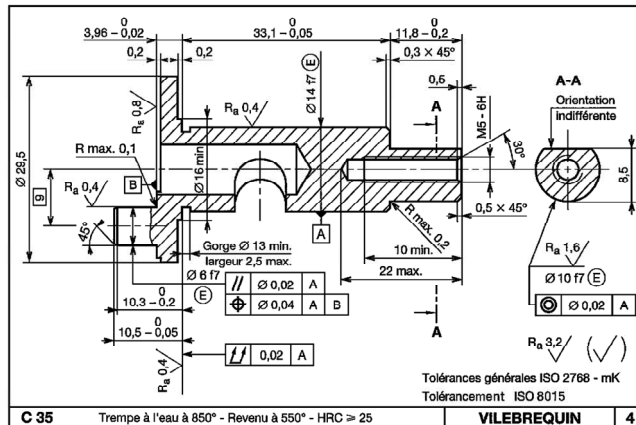
A partir da década de 20 do século XX, os princípios gerais de representação para a execução de desenhos técnicos começaram a ser objeto de **Normalização** em diferentes países (de que são exemplo as normas DIN 6:1922, BS 308:1927 e ASA Z 14.1:1935), o que contribuiu para fazer do Desenho técnico uma linguagem de carácter universal. Neste âmbito, atualmente, merecem referência as normas da série ISO 128 – “*Technical drawings – General principles of presentation*” e a norma ASME Y14.3 – “*Multiview And Sectional View Drawings*”.

Presentemente, os engenheiros e os técnicos em geral devem possuir conhecimentos de representação gráfica cada vez mais sólidos, de modo a fazerem face ao uso crescente de meios de comunicação gráfica, que tornam mais fácil a circulação da informação técnica [B4].

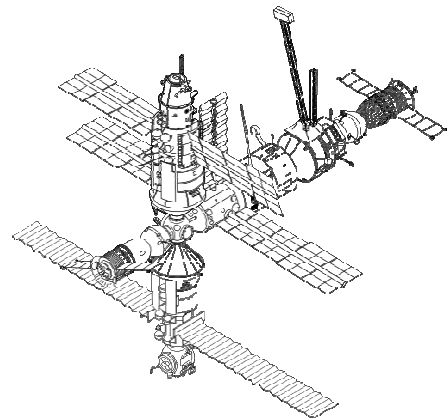
O Desenho técnico é uma linguagem gráfica normalizada, a nível mundial, que permite estabelecer a comunicação técnica entre todos os ramos da Engenharia [C3] (ver exemplos na figura 3.11). Neste contexto, a **Documentação técnica de produtos**, que engloba os diversos tipos de desenhos técnicos, é o único meio oficial de comunicação e serve de base para a interpretação dos contratos [B6].



a) Automóvel desportivo Lotus 23B (1962)



b) Desenho de definição parcial de uma cambota  
(A. Chevalier, 1998, [C1])



c) Complejo espacial MIR (1994)

Figura 3.11 – Exemplos de desenhos técnicos no domínio da Engenharia

Na década de 60, apareceram os primeiros sistemas comerciais de Concepção assistida por computador (CAD – “*Computer aided design*”) [H1] mas, até aos anos 80, os desenhos de engenharia, executados por meio de equipamento e instrumentos para traçado manual, continuaram a ser predominantes na prática industrial, sobretudo ao nível das pequenas e médias empresas (figura 3.12).





a) Exemplos de instrumentos para traçado manual



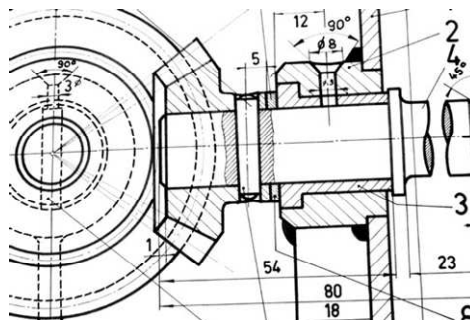
b) Sala de desenho da Saab, em Linköping, Suécia (anos 50)



c) Sala de desenho do LLNL, Livermore, California (anos 60)

Figura 3.12 – Exemplos de execução de desenhos técnicos por meio de traçado manual

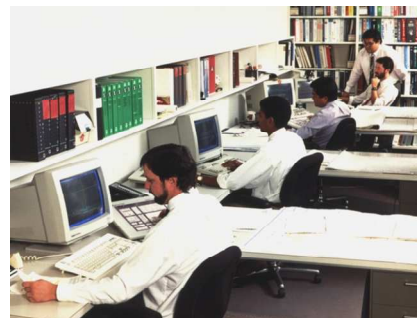
A partir do início da década de 80, com a crescente utilização de computadores pessoais (PC), nos meios universitários e industriais, começaram a surgir **sistemas de Conceção e desenho assistidos por computador (CADD – “Computer aided design and drafting”)** de baixo custo e fácil utilização, que de início vieram apenas substituir os estiradores e as máquinas de desenhar, passando a permitir a elaboração de desenhos num espaço eletrónico bidimensional (**2D**) (figura 3.13).



a) Desenho de engenharia mecânica em CAD 2D



b) Laboratório de CAD para ensino (ADEM-ISEL)



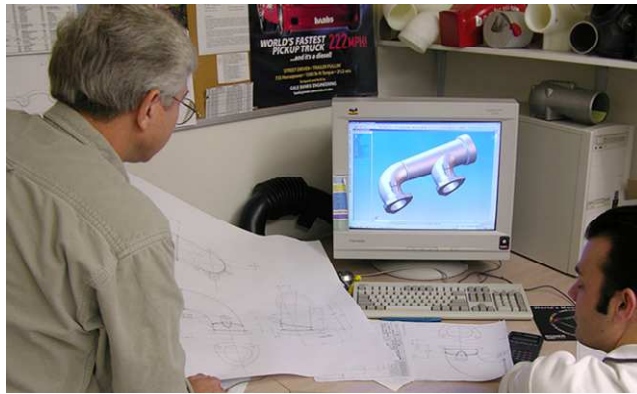
c) Sistemas de CAD em gabinete de projeto

Figura 3.13 – Exemplo de desenho em CAD 2D e diferentes instalações com sistemas de CAD

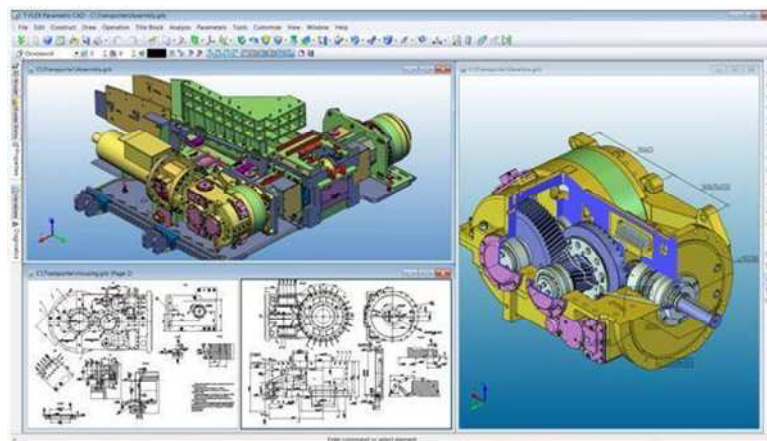


As suas principais vantagens centravam-se no aumento da rapidez de execução e revisão dos desenhos de engenharia e na possibilidade de proceder ao seu armazenamento em formato eletrónico, com vista a tornar mais fácil o intercâmbio da informação técnica [B1, B2 e H1]. Nessa época, os **desenhos de engenharia** tinham um papel dominante ao nível da representação gráfica no campo da conceção, levando a que a maioria das ligações entre as diferentes fases do processo de desenvolvimento do produto fossem pouco automatizadas, devido à necessidade de haver uma forte intervenção da componente humana na interpretação das especificações inscritas nos desenhos.

Na segunda metade dos anos 80 e sobretudo na década de 90, a generalidade destes sistemas de CAD passou também a englobar a modelação geométrica tridimensional (3D), paramétrica e baseada em “*features*”, com a capacidade de resolver a representação de problemas espaciais de conceção, diretamente no espaço 3D [B1 e B2] (figura 3.14).



a) Sistema de CAD 3D na modelação de uma peça simples (Banks Power, USA)



T-FLEX CAD system v12, da Top Systems (Russia)

b) Modelos 3D de sistemas mecânicos e respetivos desenhos de conjunto 2D

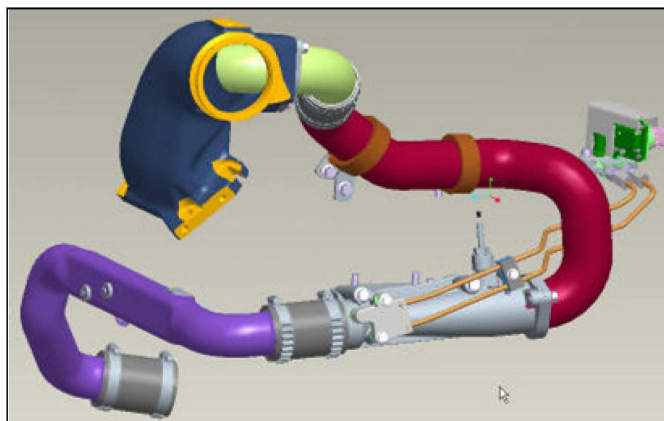
Figura 3.14 – Sistema de CAD 3D e exemplos de modelos 3D e respetivos desenhos 2D

Estes sistemas de CAD de modelação de sólidos baseiam-se num conceito de **representação paramétrica** (com a introdução de relações entre entidades geométricas) de modelos tridimensionais (3D). Toda a informação das peças individuais e da montagem do conjunto fica guardada, sendo estabelecida uma relação biunívoca entre o **modelo 3D** (definido na conceção de base) e as suas

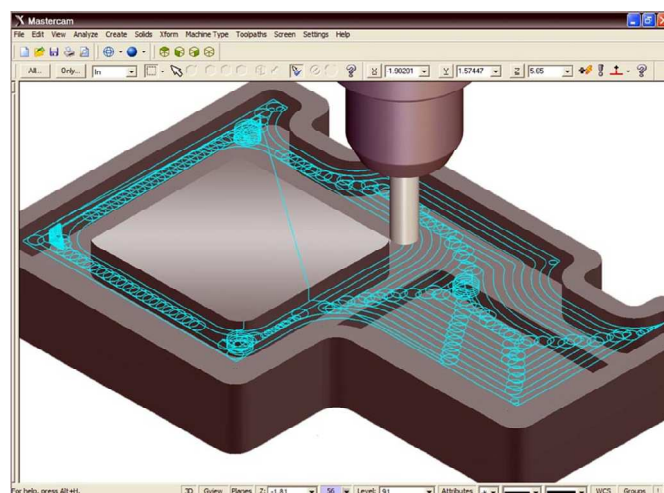
representações 2D (**desenhos de engenharia** utilizados nas fases de definição, fabricação e verificação), permitindo que qualquer alteração realizada posteriormente seja atualizada em todas as partes do sistema.

Neste novo contexto de trabalho, os **desenhos de engenharia** deixaram de ser considerados como fontes primárias da definição nominal do produto ou como sendo as representações originais dos produtos. Com efeito, o estabelecimento da **geometria nominal** de um produto através da utilização de **modelos de sólidos** pode trazer vantagens que não seriam possíveis através da manutenção de uma definição 2D estática do produto.

À medida que a modelação de sólidos foi evoluindo, foram sendo criados vários sistemas de análise com vista a apoiar e facilitar o trabalho do projetista, no âmbito da conceção e fabricação de produtos. Atividades de **modelação digital ou virtual** (DMU – “*digital mock-up activities*”) de produtos [S7], tais como a simulação do processo de montagem para a deteção precoce de interferências, podem ser contempladas [figura 3.15 a)]. A norma ISO 17599 especifica os requisitos gerais do “*digital mock-up*” (modelo ou maquete digital) para produtos mecânicos. Os modelos digitais podem também ser utilizados na **simulação do processo de fabricação** e na identificação de problemas de montagem num ambiente de fabricação digital [Q1] [figura 3.15 b)].



a) Exemplo de um modelo de interferência (ISO 29845)



b) Simulação digital do processo de fabricação (Mastercam X2)

Figura 3.15 – Exemplos de utilização de modelos 3D em atividades de modelação digital

Os modelos de sólidos servem ainda de base para a **fabricação assistida por computador (CAM – “computer-aided manufacturing”)**. As fresadoras e os tornos mecânicos comandados numericamente podem importar modelos 3D matematicamente exatos para produzir protótipos ou ferramentas [Q1] (figura 3.16).

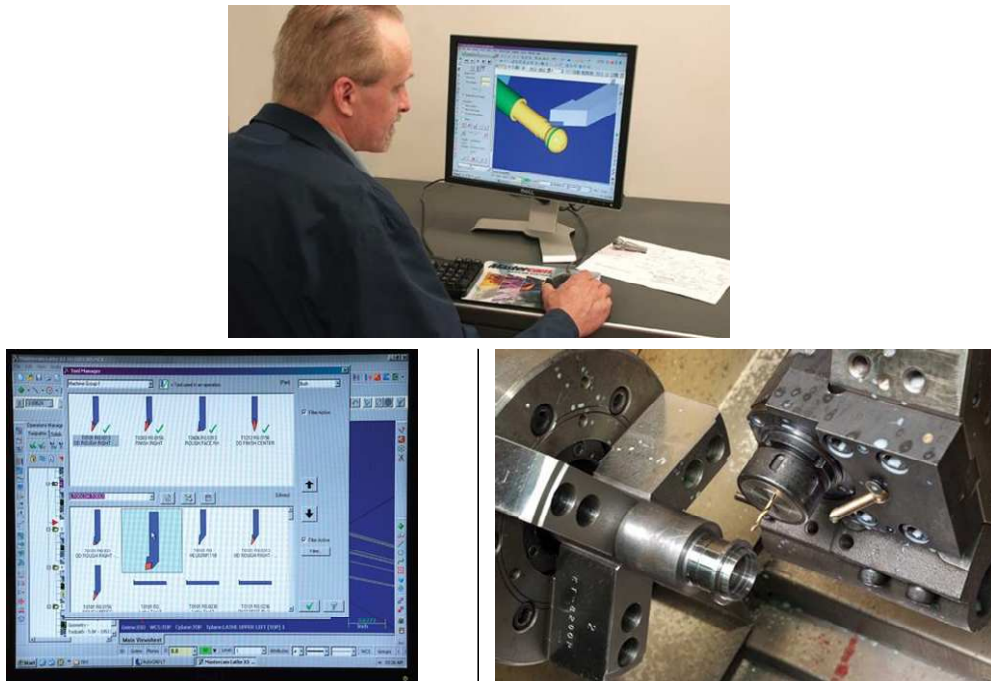
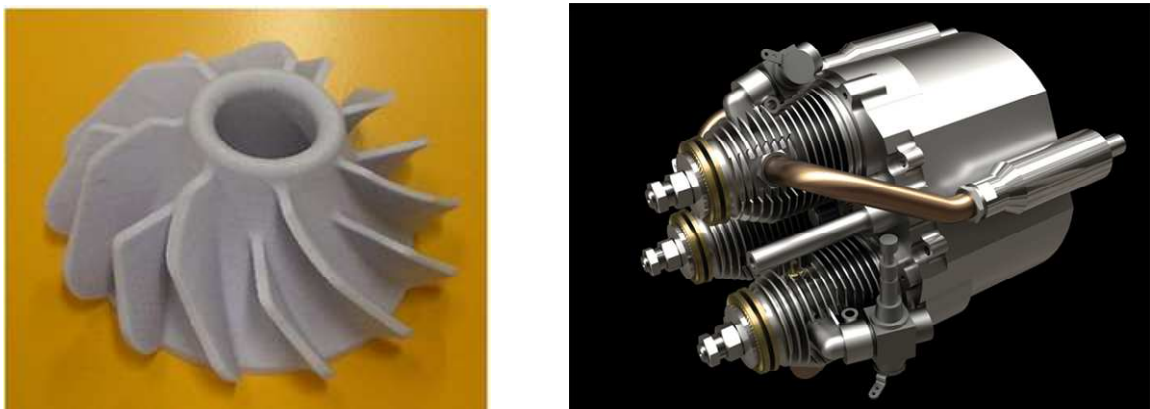


Figura 3.16 – Exemplo de utilização do sistema de CAM da Mastercam na produção de protótipos funcionais (Alinabal's MTD Group, em Milford, Connecticut, USA)

Além disso, os modelos de sólidos facilitam a produção de **modelos de fabrico aditivo** [N1]. A partir da modelação de sólidos, podem também obter-se **representações fotorrealistas de objetos** (“*photorealistic renderings*”) que permitem a produção de materiais de marketing e para a embalagem do produto, muito antes da existência do produto físico. Deste modo, publicações técnicas, catálogos com ilustrações das peças e materiais de formação podem ser desenvolvidos em simultâneo com a conceção do produto [Q1] (figura 3.17).



a) Modelo obtido por fabrico aditivo (Mcor [Matrix 3D Printer](#), Ireland) b) Representação fotorrealista (via programa HyperShot, da Bunkspeed)

Figura 3.17 – Produtos obtidos a partir de modelos 3D que podem ser utilizados em diferentes fases do processo de desenvolvimento de produtos

Os **modelos de sólidos** são, atualmente, responsáveis pela **definição da geometria nominal de um produto**, que passou a ser uma função secundária (e redundante) dos desenhos de engenharia. No entanto, os desenhos de engenharia não transmitem só informação geométrica nominal. Muitas propriedades para além da geometria nominal são modeladas ou especificadas em **desenhos de engenharia**, tais como dimensões nominais, tolerâncias, estados de superfície, tratamentos térmicos, materiais, processos de fabricação, dados de montagem e operacionais, etc. [C2]. Este tipo de desenhos, elaborados na fase da **conceção detalhada** do produto, podem ser **desenhos de definição de produto acabado**, também designados de **desenhos de detalhe** (ver exemplo na figura 3.18), desenhos de fabricação, desenhos de verificação, desenhos de instalação, etc., que permitem comunicar a definição do produto, ao longo do seu ciclo de vida.

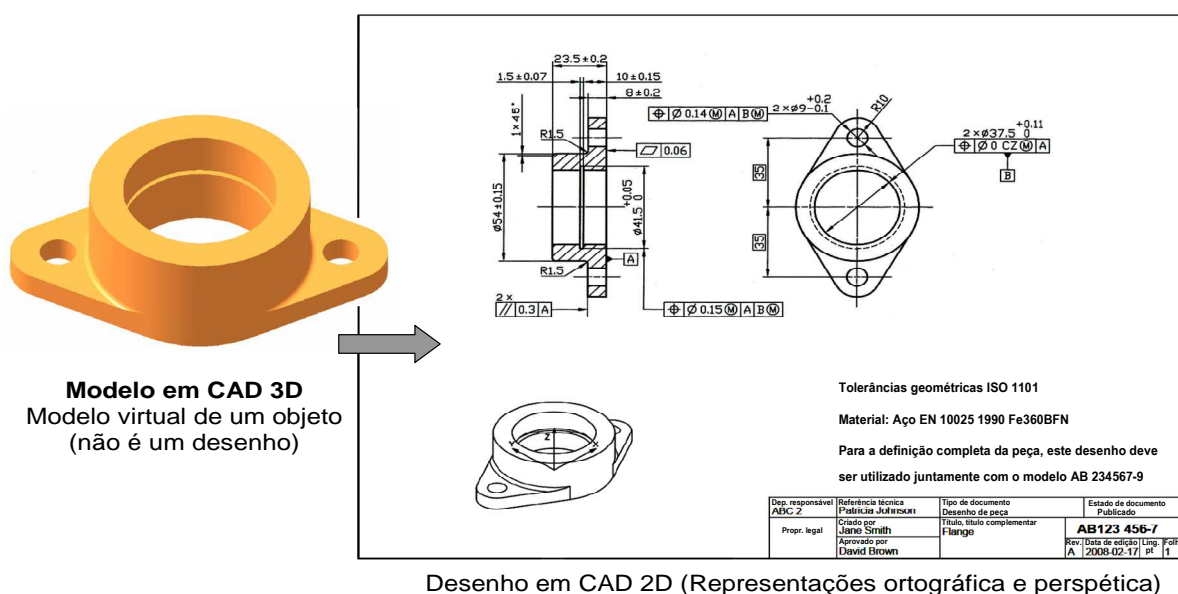


Figura 3.18 – Exemplo da definição de um produto acabado através de um desenho em CAD 2D obtido a partir de um modelo virtual gerado em CAD 3D (ISO 29845)

O procedimento de definição de um produto acabado, com recurso a desenhos 2D gerados a partir de modelos 3D, tal como representado na figura 3.18, é, atualmente, e continuará a ser, num futuro previsível, muito utilizado, a nível industrial (ver ISO 16792), atendendo aos limites da integração das fases de conceção, fabricação e verificação, registados em empresas com diferentes graus de desenvolvimento tecnológico que estabelecem, muitas vezes, relações de trabalho em regimes de “outsourcing” e de subcontratação e também devido à manutenção de processos de fabricação baseados em máquinas-ferramenta convencionais [M3].

No entanto, presentemente, impulsionado pelas indústrias automóvel e aeroespacial, está em desenvolvimento um procedimento que já permite inscrever dimensões, tolerâncias e notas diretamente em modelos geométricos 3D. A ASME – “American Society of Mechanical Engineers” publicou, em 2003, a norma ASME Y14.41 – “Digital Product Definition Data Practices”, que serviu também de base à norma ISO 16792:2006, com o mesmo título, tendo como objetivo a especificação dos requisitos necessários à preparação, revisão e apresentação de **dados de definição digital de**



**produtos**, para se poder dar resposta à necessidade de utilizar os dados gerados em CAD 3D como fontes para os processos de fabricação e/ou verificação, permitindo, desse modo, que os desenhos 2D possam vir a ser eliminados em sistemas de produção integrados. Com os novos avanços em soluções de CAD, é possível inserir dados da especificação geométrica de produtos (GPS) e notas, diretamente no modelo em CAD, formando aquilo que é conhecido como um **conjunto de dados de definição do produto baseada no modelo** (figura 3.19). Este tipo de conjunto de dados engloba a geometria nominal 3D e anotações 3D das dimensões e tolerâncias do produto (podendo incluir listas de peças/notas) para uma definição completa do produto. A definição do produto, baseada no modelo, pode ser vista como o próximo passo lógico na transição de 2D para 3D. Ao eliminar a necessidade de gerar desenhos 2D, os custos de desenvolvimento do produto e os atrasos poderão ser reduzidos, melhorando e acelerando o **ciclo de entrega do produto** [Q1].

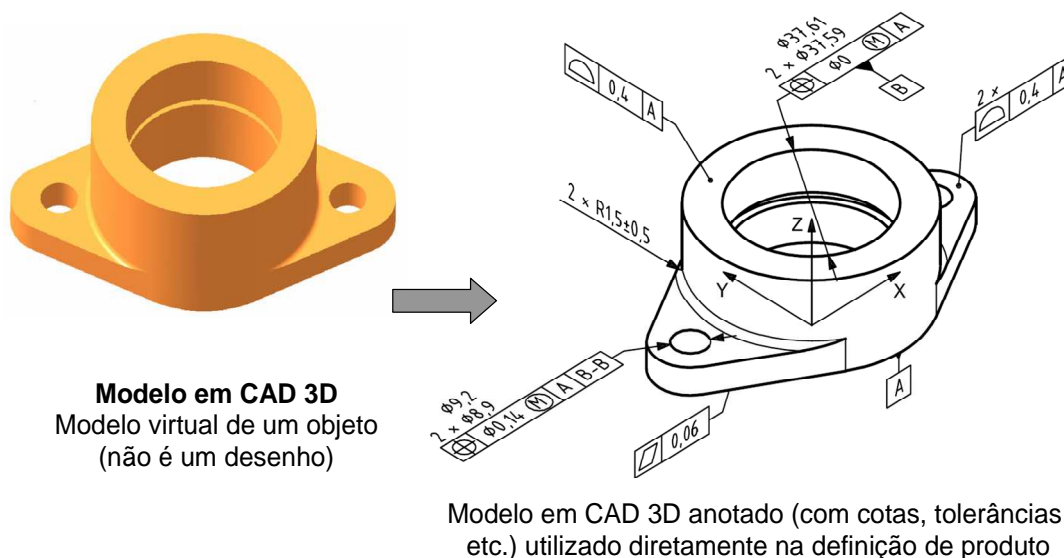


Figura 3.19 – Exemplo da definição de um produto acabado através de um modelo em CAD 3D anotado (ISO 16792)

A título de exemplo, já em 2004, a Toyota Motorsport tinha anunciado que estava envolvida num projeto de “menos desenho”, em que a conceção, a fabricação e a verificação de componentes do motor foram levadas a cabo num ambiente digital [Q1]. Também de acordo com a mesma referência, o Boeing B-777 foi um dos primeiros, na indústria aeronáutica, a ter uma definição 100 % digital. Neste caso, sempre que tal foi possível, os dados digitais foram utilizados para conduzir os processos de fabricação. A montagem completa da aeronave foi simulada utilizando técnicas digitais. As indústrias aeroespacial e de defesa estão a fazer uso do conceito de “**definição digital de produtos**” para constituir, detalhar e anotar vistas de modelos 3D para grupos de trabalho específicos, a jusante da fase de conceção detalhada, tais como de fabricação, planeamento, serviços do produto, aprovisionamento e marketing/vendas [Q1].

Finalmente, deve ser assinalado que, apesar do desenvolvimento registado, nas últimas décadas, em termos dos meios computacionais para a representação gráfica, os **desenhos executados à mão**

livre (esboços), quer em representação ortográfica, quer em representação perspética, são e continuarão a ser muito importantes, sobretudo na fase de estudo conceptual [M3] (ver exemplos na figura 3.20).

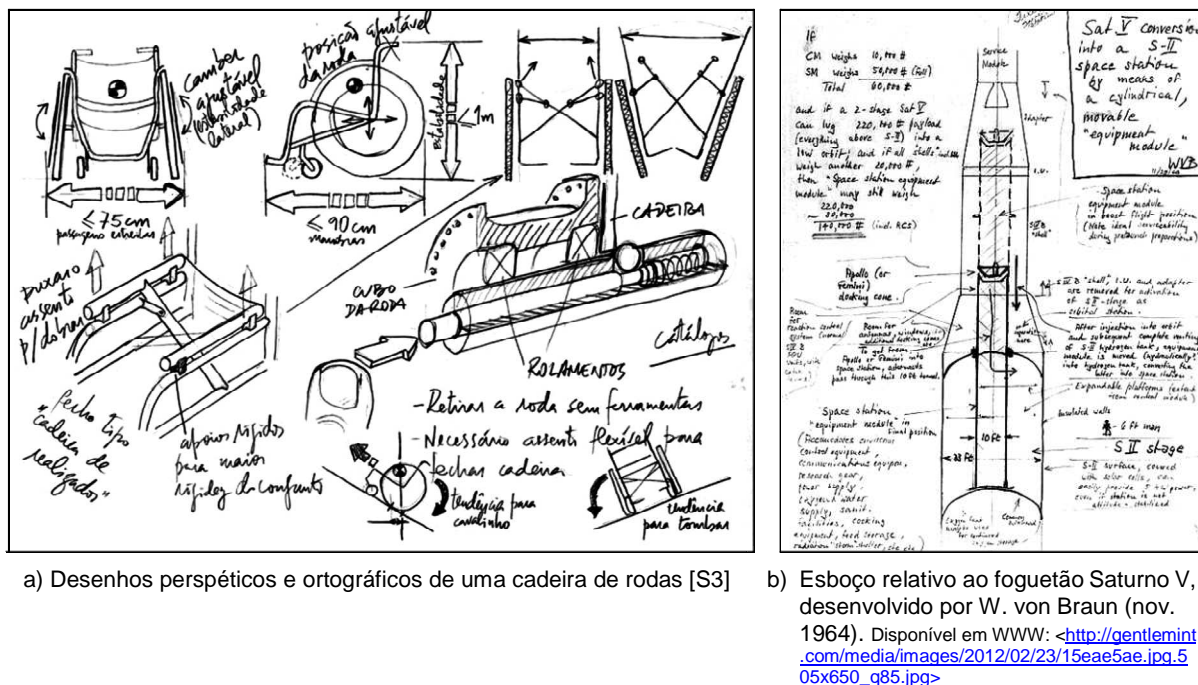


Figura 3.20 – Exemplos de desenhos executados à mão livre, em folhas de papel

A aptidão para fazer esboços à mão livre, em folhas de papel, é uma competência muito importante em termos da representação gráfica em engenharia, pois permite desenvolver as **capacidades de visualização espacial e de comunicação técnica** – imaginar soluções construtivas, traduzindo-as em desenhos ilustrativos ou explicando-as a outros. De notar que, atualmente, para além da utilização de suportes em papel, os esboços podem também ser realizados, por exemplo, em *tablets* PC [B1, B2 e H1].

Em conclusão, o progresso tecnológico registado no âmbito da atual globalização vai continuar a depender de engenheiros e técnicos com conhecimentos e capacidades para representar e ler imagens 3D, utilizando, em simultâneo, ferramentas tradicionais e computacionais, pelo que este facto não deverá ser ignorado em termos do ensino da representação gráfica ao nível do ensino universitário e da formação técnica.

### 3.3 O sistema normativo para a preparação de especificações técnicas de produtos

No contexto de uma globalização em que a comunicação mais ou menos informal entre a conceção e a fabricação foi fortemente reduzida ou, por vezes, praticamente eliminada, a ISO publicou, em 2009, o relatório técnico ISO/TR 23605 [A1], com o objetivo de **definir um modelo internacional que**

**estabeleça os requisitos para a preparação de todas as formas de especificação técnica de produtos (TPS).** Este modelo é concebido para facilitar a elaboração de normas nacionais relativas à definição, especificação e representação gráfica de produtos técnicos e os requisitos nele especificados são referidos a um conjunto de normas internacionais (ISO), consideradas essenciais para a obtenção de uma compatibilidade internacional entre as normas dos diferentes países.

O modelo proposto no ISO/TR 23605 apresenta uma estruturação formal das relações entre as diferentes normas referenciadas, tendo em conta a matriz das normas relevantes no domínio GPS, fornecida no anterior ISO/TR 14638 (atual ISO 14638) (ver também o capítulo 4).

A **construção de um sistema coerente para a Especificação técnica de produtos (TPS)** assenta na aplicação das normas no domínio da Especificação geométrica de produtos (GPS) em conjunto com as normas de representação da Documentação técnica de produtos (TPD). Os princípios TPS devem ser utilizados durante o desenvolvimento de um produto, isto é, na conceção, fabricação, metrologia e verificação, e a sua aplicação consistente possibilitará uma redução das ambiguidades e interpretações incorretas, uma melhoria dos tempos de resposta e uma diminuição significativa da necessidade de efetuar ações corretivas.

No nosso País, a elaboração de normas nacionais no domínio da Documentação técnica de produtos (TPD), em conformidade com as correspondentes normas internacionais (ISO) e europeias (EN) é da responsabilidade da **Comissão técnica CT1 – “Desenho técnico”**, cujo funcionamento é assegurado pelo INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, que é reconhecido, pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ), como Organismo com funções de Normalização Setorial (ONS) neste domínio. No entanto, no que respeita à Especificação geométrica de produtos (GPS), presentemente, a Comissão técnica portuguesa de normalização, ativa neste domínio, ainda não produziu qualquer documento normativo.

### 3.3.1 O estudo conceptual

Antes de se proceder à especificação técnica de um produto, dever-se-ão estabelecer os requisitos principais a que este deverá obedecer, dando particular atenção às necessidades funcionais a satisfazer. A intenção do estudo conceptual pode, então, ser representada na forma de uma disposição de conceção, esquema ou modelo simplificado gerado em computador, se bem que, normalmente, tal não seja utilizado na documentação técnica de produtos, detalhada para fins de fabricação.

A importância desta fase (ou estágio) não pode ser exagerada. A compreensão clara do fim e da função previstos para o eventual produto, o conhecimento dos requisitos dos métodos de fabricação disponíveis e a consciência dos procedimentos de verificação aplicáveis ajudarão a assegurar que o grau de complexidade da especificação seja apropriado e adequado.

Por outro lado, é importante que o projetista apresente o resultado do processo de concepção, isto é, o conjunto de documentação técnica de produtos (TPD) que inclui a especificação técnica de produtos, de um modo que evite a ambiguidade e qualquer risco de equívoco ou de interpretação errada. Por esta razão, é fundamental que o projetista esteja familiarizado com os requisitos indicados neste texto e consciente do aumento da precisão de especificação que o seu uso pode trazer.

Por estes e muitos outros motivos, a gestão do processo de concepção global pode ser complexa, sendo recomendável que os projetistas conheçam bem as normas publicadas nestes domínios.

### 3.3.2 Documentos normativos a considerar na preparação de uma TPS

Os diferentes documentos normativos em vigor, a considerar na preparação de especificações técnicas de produtos, no domínio da Engenharia mecânica, estão referidos, por exemplo, nos relatórios técnicos ISO/TR 23605 e ISO/TR 14638 e na norma NP ISO 128-1.

#### 3.3.2.1 Normas globais

As normas “globais” (ver ISO/TR 14638) suportam ou influenciam todo o processo de Especificação técnica de produtos (TPS). Neste âmbito, podem considerar-se as seguintes normas:

<b>EN ISO 1</b>	– <i>Geometrical Product Specifications (GPS) – Standard reference temperature for geometrical product specification and verification (ISO 1:2002).</i> CEN.
<b>EN ISO 10579</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Dimensioning and tolerancing – Non-rigid parts (ISO 10579:2010 + Cor 1:2011).</i> CEN.
<b>EN ISO 14235-1</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications (ISO 14253-1:2013).</i> CEN.
<b>EN ISO 14235-2</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification (ISO 14253-2:2011).</i> CEN.
<b>EN ISO 14235-3</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 3: Guidelines for achieving agreements on measurement uncertainty statements (ISO 14253-3:2011).</i> CEN.
<b>CEN ISO/TS 14235-4</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 4: Background on functional limits and specification limits in decision rules (ISO/TS 14253-4:2010).</i> CEN.
<b>ISO/TR 14235-6</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 6: Generalized decision rules for the acceptance and rejection of instruments and workpieces.</i> ISO.
<b>EN ISO 14406</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Extraction (ISO 14406:2010).</i> ISO.
<b>ISO 14660-1</b>	– <i>Geometrical Product Specification (GPS) – Geometrical features – Part 1: General terms and definitions.</i> ISO (anulada em 2012).
<b>ISO/TR 16015</b>	– <i>Geometrical Product Specification (GPS) – Systematic errors and contributions to measurement uncertainty of linear dimensional measurements due to thermal influences.</i> ISO.
<b>GUM</b>	– <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.</i> ISO.
<b>VIM</b>	– <i>Vocabulário Internacional de Metrologia. Termos fundamentais e gerais.</i> IPQ.



Com a publicação da norma ISO 14638:2015, em substituição do ISO/TR 14638, o tipo de normas GPS “globais” foi eliminado, uma vez que não se distinguia, significativamente, tanto das normas GPS “fundamentais” como das “gerais”. As normas de tipo “global” que não foram anuladas serão reclassificadas como normas GPS “fundamentais” ou “gerais”.

### 3.3.2.2 Tipos de documentação

Se possível, a documentação técnica de produtos (TPD) deverá ser de um dos tipos indicados num dos documentos normativos a seguir referidos, e deverá ser elaborada em conformidade com as respetivas recomendações:

- NP ISO 7573** – *Documentação técnica de produtos. Listas de peças.* IPQ.
- NP ISO 11005** – *Documentação técnica de produtos. Utilização de documentos principais.* IPQ.
- NP EN ISO 10209** – *Documentação técnica de produtos. Vocabulário – Termos relativos aos desenhos técnicos, à definição de produtos e à documentação associada (ISO 10209:2012).* IPQ.
- NP ISO 29845** – *Documentação técnica de produtos. Tipos de documentos.* IPQ.

Para algumas Especificações técnicas de produtos (TPS) pode ser adequado mostrar um conjunto, a lista de peças e detalhes constituintes desenhados separadamente, todos no mesmo desenho (**Desenho combinado**). Por outro lado, pode ser apropriado estabelecer uma lista de todas as representações gráficas e especificações adotadas, necessárias para construir um conjunto particular, do qual derivam o seu título e o seu número de identificação principal [**Lista de documentos (Lista de desenhos)**].

### 3.3.2.3 Relação entre a definição de conceção e a sua interpretação

A preparação cuidadosa dos documentos técnicos de produtos (TPDs), tendo em vista os utilizadores conhecidos ou potenciais, vai ter influência no grau de exatidão com que a especificação irá ser convertida no produto final. Embora a precisão e a ausência de ambiguidades devam ser sempre objetivos primordiais, **os meios utilizados para transmitir a informação deverão ser considerados tendo em conta a capacidade, ou a capacidade potencial, dos meios de fabricação disponíveis ou possíveis**. Para além desse nível, é improvável que a especificação produza resultados satisfatórios e, muitas vezes, revela ser cara, quer em termos do custo da própria sobre-especificação, quer em termos da não adequação ou da não aceitação do produto.

Apesar de todo o cuidado tido na preparação da especificação técnica de um produto, vão existir sempre zonas de incerteza derivadas da transformação da função pretendida para a peça em especificação geométrica (**ambiguidade de descrição da função**), da **ambiguidade de especificação** e da verificação ser sempre executada de modo imperfeito (**incerteza de medição**). De modo a assegurar que as zonas de incerteza serão minimizadas, os princípios aplicados na especificação devem estar em conformidade com as seguintes normas:

- EN ISO 17450-1** – *Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 1: Model for geometrical specification and verification* (ISO 17450-1:2011). CEN.
- EN ISO 17450-2** – *Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 2: Basic tenets, specifications, operators, uncertainties and ambiguities* (ISO 17450-2:2012). CEN.

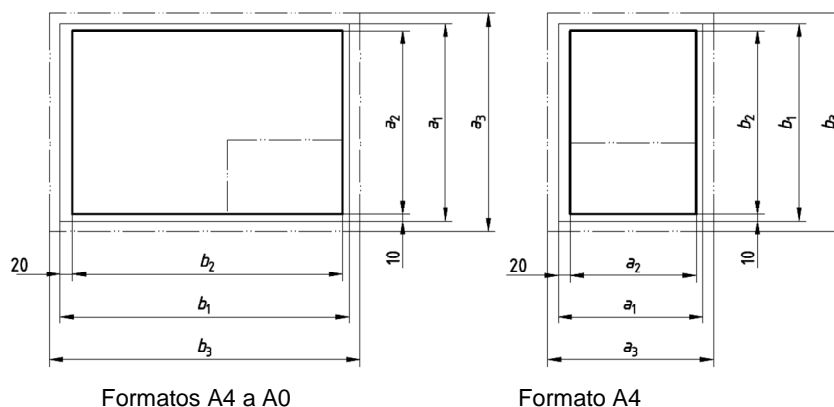
### 3.3.2.4 Meios de apresentação de desenhos

A apresentação de desenhos deverá ser realizada em conformidade com as seguintes normas:

- NP EN ISO 5457** – *Documentação técnica de produtos; Formatos e apresentação dos elementos gráficos das folhas de desenho* (ISO 5457:1999 + Emenda 1:2010). IPQ.
- NP EN ISO 7200** – *Documentação técnica de produtos; Campos de dados em legendas e cabeçalhos de documentos* (ISO 7200:2004). IPQ.

Os formatos preferenciais das folhas da série ISO-A, para desenhos técnicos, estão indicados no quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Formatos das folhas para desenho técnico (NP EN ISO 5457)



Dimensões em milímetros

Designação	Folha cortada (T)		Zona de desenho		Folha não cortada (U)	
	$a_1$ <sup>1)</sup>	$b_1$ <sup>1)</sup>	$a_2$ $\pm 0,5$	$b_2$ $\pm 0,5$	$a_3$ $\pm 2$	$b_3$ $\pm 2$
<b>A0</b>	841	1189	821	1159	880	1230
<b>A1</b>	594	841	574	811	625	880
<b>A2</b>	420	594	400	564	450	625
<b>A3</b>	297	420	277	390	330	450
<b>A4</b>	210	297	180	277	240	330
Nota – Para formatos > A0, ver a ISO 216.						
<sup>1)</sup> Para tolerâncias, ver a ISO 216.						

As folhas dos formatos A0 a A3 devem ser orientadas na horizontal. A folha de formato A4 pode ser orientada quer na horizontal quer na vertical.

Os comprimentos dos lados das folhas são valores numéricos da série de Números normais derivada R 40/6 (... 1189), com uma razão de  $(\sqrt[4]{10})^6 = 1,41$ . A relação de lados  $1:\sqrt{2}$  é a única proporção que assegura uma relação constante dos lados, aquando das divisões sucessivas dos formatos.

### 3.3.2.5 Escalas

As escalas deverão ser escolhidas em conformidade com a norma:

**NP EN ISO 5455** – *Desenhos técnicos. Escalas* (ISO 5455:1979). IPQ.

As escalas recomendadas, para utilização em desenhos técnicos, estão indicadas no quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Escalas (NP EN ISO 5455)

Categoria	Escala recomendada		
Escalas de ampliação	50 : 1 5 : 1	20 : 1 2 : 1	10 : 1
Verdadeira grandeza	1 : 1		
Escalas de Redução	1 : 2 1 : 20 1 : 200 1 : 2000	1 : 5 1 : 50 1 : 500 1 : 5000	1 : 10 1 : 100 1 : 1000 1 : 10000

Os valores das escalas pertencem à série de Números normais R' 3, com uma razão  $\sqrt[3]{10} = 2,15$ , não normalizada pela ISO, mas são também da série normalizada R 10. Com o advento dos sistemas de CAD e a capacidade de se poder visualizar os desenhos em formato eletrónico numa qualquer escala, diminuiu a importância da utilização de uma gama de escalas normalizadas. Os modelos 3D produzidos em sistemas de CAD devem ser sempre realizados à escala 1:1 (ver BS 8888).

### 3.3.2.6 Linhas

As linhas deverão estar em conformidade com as seguintes normas, quando adequadas:

**NP EN ISO 128-20** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 20: Convenções de base para as linhas* (ISO 128-20:1996). IPQ.

**NP EN ISO 128-21** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 21: Preparação de linhas por sistemas de CAD* (ISO 128-21:1997). IPQ.

**NP ISO 128-22** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 22: Convenções de base e aplicações para as linhas de indicação e as linhas de referência*. IPQ.

**NP ISO 128-23** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 23: Linhas utilizadas na documentação de construção e de engenharia civil*. IPQ.

**NP ISO 128-24** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 24: Linhas utilizadas em desenhos de engenharia mecânica*. IPQ.

**NP ISO 128-25** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 25: Linhas utilizadas em desenhos de construção naval*. IPQ.

De acordo com o tipo e o tamanho do desenho, as espessuras de traço de todos os tipos de linhas devem ser escolhidas a partir dos valores do quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Espessuras de traço para todos os tipos de linha (NP EN ISO 128-20)

0,13 mm	0,18 mm	0,25 mm	0,35 mm	0,5 mm	0,7 mm	1 mm	1,4 mm	2 mm
---------	---------	---------	---------	--------	--------	------	--------	------

Estes valores das espessuras são da série de Números normais derivada R" 20/3 (0,13 ... 2) que tem uma razão de  $1:\sqrt{2}$  ( $\approx 1:1,4$ ). O fator multiplicador  $\sqrt{2}$  utilizado na gama das espessuras de traço deriva da progressão normalizada das dimensões dos lados dos formatos de papel (ver ISO 216). Em desenhos de engenharia mecânica, utilizam-se normalmente duas espessuras de traço (grosso e fino), preferencialmente 0,7 mm e 0,35 mm ou 0,5 mm e 0,25 mm (NP ISO 128-24).

### 3.3.2.7 Escrita

A escrita deverão estar em conformidade com as seguintes normas, quando adequadas:

- NP EN ISO 3098-0** – *Documentação técnica do produto. Escrita. Parte 0: Especificações gerais* (ISO 3098-0:1997). IPQ.
- NP EN ISO 3098-2** – *Documentação técnica do produto. Escrita. Parte 2: Alfabeto latino, algarismos e sinais* (ISO 3098-2:2000). IPQ.
- NP EN ISO 3098-3** – *Documentação técnica de produtos. Escrita. Parte 3: Alfabeto grego* (ISO 3098-3:2000). IPQ.
- NP EN ISO 3098-4** – *Documentação técnica de produtos. Escrita. Parte 4: Sinais diacríticos e sinais particulares do alfabeto latino* (ISO 3098-4:2000). IPQ.
- NP EN ISO 3098-5** – *Documentação técnica de produtos. Escrita. Parte 5: Escrita em aplicações de desenho assistido por computador (CAD) do alfabeto latino, de algarismos e de sinais* (ISO 3098-5: 1997). IPQ.
- NP EN ISO 3098-6** – *Documentação técnica de produtos. Escrita. Parte 6: Alfabeto cirílico* (ISO 3098-6:2000). IPQ.

A gama normalizada de alturas (dimensões) nominais de escrita está indicada no quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Gama de alturas nominais de escrita (ISO 3098-0)

1,8 mm	2,5 mm	3,5 mm	5 mm	7 mm	10 mm	14 mm	20 mm
--------	--------	--------	------	------	-------	-------	-------

Os valores das alturas de escrita são da série de Números normais derivada R" 20/3 (1,8 ... 20) que tem uma razão de  $1:\sqrt{2}$  ( $\approx 1:1,4$ ). Este fator multiplicador  $\sqrt{2}$  utilizado na gama de alturas deriva da progressão normalizada das dimensões dos lados dos formatos de papel (ver ISO 216).

### 3.3.2.8 Métodos de projeção

Os métodos de projeção deverão estar em conformidade com as seguintes normas:

- NP EN ISO 5456-1** – *Desenhos técnicos. Métodos de projeção. Parte 1: Sinopse* (ISO 5456-1:1996). IPQ.
- NP EN ISO 5456-2** – *Desenho técnico. Métodos de projeção. Parte 2: Representações ortográficas* (ISO 5456-2:1996). IPQ.
- NP EN ISO 5456-3** – *Desenho técnico. Métodos de projeção. Parte 3: Representações axonométricas* (ISO 5456-3:1996). IPQ.
- NP EN ISO 5456-4** – *Desenhos técnicos. Métodos de projeção. Parte 4: Projeção central* (ISO 5456-4:1996). IPQ.
- NP EN ISO 10209** – *Documentação técnica de produtos. Vocabulário – Termos relativos aos desenhos técnicos, à definição de produtos e à documentação associada* (ISO 10209:2012). IPQ.

### 3.3.2.9 Princípios gerais de representação

A representação de objetos deverá estar em conformidade com as seguintes normas:

- NP ISO 128-1** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 1: Introdução e índice.* IPQ.
- ISO 128-15** – *Technical product documentation (TPD) – General principles of presentation – Part 15: Presentation of shipbuilding drawings.* IPQ.
- NP ISO 128-30** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 30: Convenções de base para as vistas.* IPQ.
- NP ISO 128-34** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 34: Vistas em desenhos de engenharia mecânica.* IPQ.
- NP ISO 128-40** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 40: Convenções de base para os cortes e as secções.* IPQ.
- NP ISO 128-44** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 44: Cortes e secções em desenhos de engenharia mecânica.* IPQ.
- NP ISO 128-50** – *Desenhos técnicos. Princípios gerais de representação. Parte 50: Convenções de base para a representação de áreas em cortes e secções.* IPQ.
- DNP ISO/TS 128-71** – *Documentação técnica de produtos (TPD); Princípios gerais de representação; Parte 71: Representação simplificada para desenhos de engenharia mecânica.* IPQ.

A norma NP ISO 128-30 indica o **método das setas referenciadas** (ver figura 3.21) como sendo o atual método preferencial de representação, embora esclareça que os métodos do primeiro diedro e do terceiro diedro continuam a ser considerados como alternativas, em termos normativos.

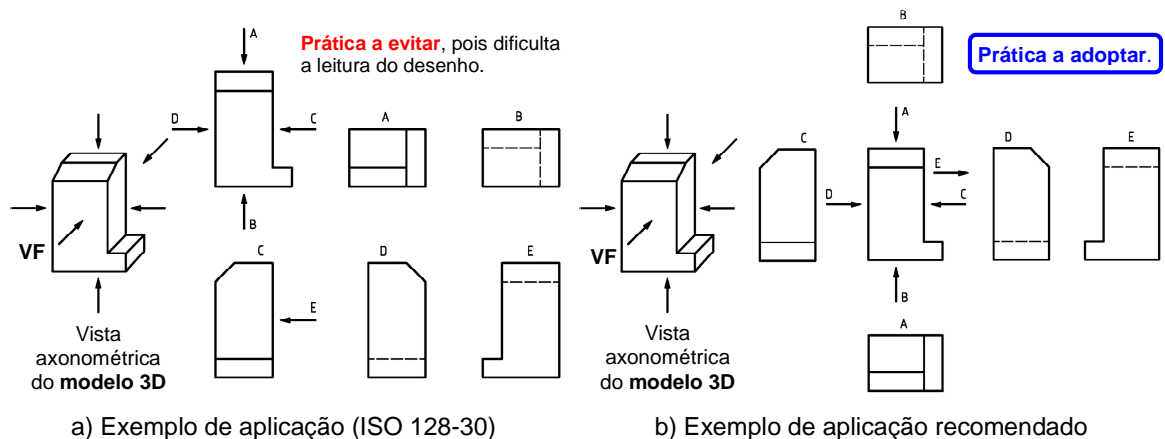


Figura 3.21 – O método das setas referenciadas como método preferencial

Tradicionalmente, existem duas práticas de representação muito enraizadas a nível industrial: o método do 1º diedro (ver exemplo na figura 3.9), utilizado na Europa e na generalidade dos países do mundo; e o método do 3º diedro (ver exemplo na figura 3.10), utilizado nos USA, Canadá e Austrália, entre outros países, pelo que, atualmente, circulam, em todo o mundo, desenhos realizados através de ambos os métodos de representação.

Esta preferência da ISO 128-30 pelo método das setas referenciadas deverá ter sido ditada, em primeiro lugar, pela tentativa de unificação das duas práticas tradicionais de representação, com vista

facilitar a comunicação no novo mercado global. Por outro lado, como, a nível industrial, os desenhos técnicos deixaram de ser as representações originais dos produtos, uma vez que estes começaram a ser modelados em CAD 3D, as vistas geradas a partir do CAD passaram a poder ser colocadas em qualquer zona do suporte (desde que referenciadas em relação à vista principal), de modo a possibilitar uma gestão melhor do espaço disponível no suporte do desenho. No entanto, em termos industriais, com objetos complexos, o exemplo de aplicação apresentado, na figura 3.21 a), dificultaria muito a utilização do desenho como ferramenta de apoio em tarefas de fabricação, verificação, montagem, etc., pois a coordenação da informação gráfica transmitida pelas diversas vistas passaria a ser muito mais complicada. Logo, para assegurar a operacionalidade dos desenhos 2D, facilitando ao mesmo tempo a comunicação no mercado global, aconselha-se a que, sempre que possível, os desenhos de engenharia sejam construídos com base na tradição de representação de quem os realiza, mas que, adicionalmente, todas as vistas passem a ser referenciadas em relação à vista principal, conforme indicado, a título de exemplo, na figura 3.21 b), em termos de uma disposição de vistas realizada de acordo com o método de projeção do 1º diedro.

#### 3.3.2.10 Referências de peças

As referências de peças deverão estar em conformidade com a seguinte norma:

**NP EN ISO 6433** – *Documentação técnica de produtos; Referências de peças* (ISO 6433:2012). IPQ.

#### 3.3.2.11 Representação gráfica (abreviaturas e símbolos)

##### 3.3.2.11.1 Abreviaturas

As abreviaturas deverão ser as mesmas no singular e no plural. Não devem ser utilizados pontos finais, exceto se a abreviatura formar uma palavra (p. ex. No. como abreviatura de “número”). Não poderá ser utilizada qualquer abreviatura para representar mais do que um conceito, numa qualquer especificação técnica de produtos.

##### 3.3.2.11.2 Símbolos utilizados para grandezas físicas

Os símbolos utilizados para grandezas físicas e unidades de medida deverão estar em conformidade com as seguintes normas, quando adequadas:

- EN ISO 80000-1** – *Quantities and units – Part 1: General* (ISO 80000-1:2009 + Cor 1:2011). CEN.
- EN ISO 80000-2** – *Quantities and units – Part 2: Mathematical signs and symbols for use in physical sciences and technology* (ISO 80000-2:2009). CEN.
- EN ISO 80000-3** – *Quantities and units – Part 3: Space and time* (ISO 80000-3:2006). CEN.
- EN ISO 80000-4** – *Quantities and units – Part 4: Mechanics* (ISO 80000-4:2006). CEN.
- EN ISO 80000-5** – *Quantities and units – Part 5: Thermodynamics* (ISO 80000-5:2007). CEN.
- EN 80000-6** – *Quantities and units – Part 6: Electromagnetism*. CEN.
- ISO 80000-7** – *Quantities and units – Part 7: Light*. ISO.

<b>EN ISO 80000-8</b>	– <i>Quantities and units – Part 8: Acoustics</i> (ISO 80000-8:2007). CEN.
<b>EN ISO 80000-9</b>	– <i>Quantities and units – Part 9: Physical chemistry and molecular physics</i> (ISO 80000-9:2009 + Amd 1:2011). CEN.
<b>EN ISO 80000-10</b>	– <i>Quantities and units – Part 10: Atomic and nuclear physics</i> (ISO 80000-10:2009). CEN.
<b>EN ISO 80000-11</b>	– <i>Quantities and units – Part 11: Characteristic numbers</i> (ISO 80000-11:2008). CEN.
<b>EN ISO 80000-12</b>	– <i>Quantities and units – Part 12: Solid state physics</i> (ISO 80000-12:2009). CEN.
<b>EN 80000-13</b>	– <i>Quantities and units – Part 13: Information science and technology</i> . CEN.
<b>EN 80000-14</b>	– <i>Quantities and units – Part 14: Telebiometrics related to human physiology</i> . CEN.

Estes símbolos não deverão ser utilizados para representar quaisquer outros conceitos e não se deverão utilizar abreviaturas em vez de símbolos alfanuméricos.

### 3.3.2.11.3 Símbolos gerais

Os símbolos utilizados para transmitir conceitos, em especificações técnicas de produtos, para além dos relativos a grandezas físicas e unidades de medida, deverão estar em conformidade com as normas seguintes, quando adequadas, não devendo ser utilizados para representar qualquer outro conceito.

<b>ISO 701</b>	– <i>International gear notation – Symbols for geometrical data</i> . ISO.
<b>ISO 1219-1</b>	– <i>Fluid power systems and components – Graphical symbols and circuit diagrams – Part 1: Graphical symbols for conventional use and data-processing applications</i> . ISO.
<b>ISO 1219-2</b>	– <i>Fluid power systems and components – Graphical symbols and circuit diagrams – Part 2: Circuit diagrams</i> . ISO.
<b>NP ISO 3511-1</b>	– <i>Funções e instrumentação para a medição e controlo de processos industriais. Representação simbólica. Parte 1: Requisitos de base</i> . IPQ.
<b>NP ISO 3511-2</b>	– <i>Funções e instrumentação para a medição e controlo de processos industriais. Representação simbólica. Parte 2: Extensão dos requisitos de base</i> . IPQ.
<b>NP ISO 3511-3</b>	– <i>Funções e instrumentação para a medição e controlo de processos industriais. Representação simbólica. Parte 3: Símbolos detalhados para esquemas de interligação de instrumentos</i> . IPQ.
<b>NP ISO 3511-4</b>	– <i>Funções e instrumentação para a medição e controlo de processos industriais. Representação simbólica. Parte 4: Símbolos de base para funções de computador de processo, de interface e de indicação/controlo partilhadas</i> . IPQ.
<b>NP EN ISO 3952-1</b>	– <i>Esquemas cinemáticos. Símbolos gráficos. Parte 1</i> (ISO 3952-1:1981 + Emenda 1:2002). IPQ.
<b>NP EN ISO 3952-2</b>	– <i>Esquemas cinemáticos. Símbolos gráficos. Parte 2</i> (ISO 3952-2:1981). IPQ.
<b>NP EN ISO 3952-3</b>	– <i>Esquemas cinemáticos. Símbolos gráficos. Parte 3</i> (ISO 3952-3:1979). IPQ.
<b>NP EN ISO 3952-4</b>	– <i>Esquemas cinemáticos. Símbolos gráficos. Parte 4</i> (3952-4:1984). IPQ.
<b>ISO 5784-1</b>	– <i>Fluid power systems and components – Fluid logic circuits – Part 1: Symbols for binary logic and related functions</i> . ISO.
<b>ISO 5784-2</b>	– <i>Fluid power systems and components – Fluid logic circuits – Part 2: Symbols for supply and exhausts as related to logic symbols</i> . ISO.
<b>ISO 5784-3</b>	– <i>Fluid power systems and components – Fluid logic circuits – Part 3: Symbols for logic sequencers and related functions</i> . ISO.
<b>NP ISO 14617-1</b>	– <i>Símbolos gráficos para esquemas. Parte 1: Informação geral e índices</i> . IPQ.
<b>NP ISO 14617-2</b>	– <i>Símbolos gráficos para esquemas. Parte 2: Símbolos de aplicação geral</i> . IPQ.
<b>NP ISO 14617-3</b>	– <i>Símbolos gráficos para esquemas. Parte 3: Conexões e dispositivos associados</i> . IPQ.
<b>NP ISO 14617-4</b>	– <i>Símbolos gráficos para esquemas. Parte 4: Atuadores e dispositivos associados</i> . IPQ.

- NP ISO 14617-5** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 5: Dispositivos de medição e controlo.* IPQ.
- NP ISO 14617-6** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 6: Funções de medição e controlo.* IPQ.
- NP ISO 14617-7** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 7: Componentes mecânicos de base.* IPQ.
- NP ISO 14617-8** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 8: Válvulas e registos.* IPQ.
- NP ISO 14617-9** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 9: Bombas, compressores e ventiladores.* IPQ.
- NP ISO 14617-10** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 10: Conversores para transmissões hidráulicas e pneumáticas.* IPQ.
- NP ISO 14617-11** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 11: Dispositivos para transferência de calor e motores térmicos.* IPQ.
- NP ISO 14617-12** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 12: Dispositivos de separação, purificação e mistura.* IPQ.
- NP ISO 14617-13** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 13: Dispositivos para transformação de materiais.* IPQ.
- NP ISO 14617-14** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 14: Dispositivos para transporte e movimentação de materiais.* IPQ.
- NP ISO 14617-15** – *Símbolos gráficos para esquemas. Parte 15: Esquemas de instalação e mapas de rede.* IPQ.
- NP ISO 15519-1** – *Especificações para esquemas da indústria de processo. Parte 1: Regras gerais.* IPQ.
- NP EN ISO 81714-1** – *Conceção de símbolos gráficos para utilização em documentação técnica de produtos. Parte 1: Regras de base (ISO 81714-1:2010).* IPQ.

#### 3.3.2.11.4 Equivalentes textuais

Os equivalentes textuais são utilizados, para fins de comunicação, como um suplemento das normas de indicações nos desenhos e não deverão ser empregues na especificação de requisitos. As especificações técnicas seguintes fornecem orientações para a utilização de equivalentes textuais:

- ISO/TS 14995-1** – *Geometrical Product Specification (GPS) – Textual equivalents for dimensional and geometrical tolerancing – Part 1: Basic rules.* ISO (entretanto retirada do programa de trabalho da ISO).
- ISO/TS 14995-2** – *Geometrical Product Specification (GPS) – Textual equivalents for dimensional and geometrical tolerancing – Part 1: List of text equivalents.* ISO (entretanto retirada do programa de trabalho da ISO).

#### 3.3.2.12 Representação de elementos

As convenções utilizadas para a representação de elementos deverão estar em conformidade com as seguintes normas, quando adequadas:

- NP EN ISO 5261** – *Desenhos técnicos. Representação simplificada de barras e de perfis (ISO 5261:1995).* IPQ.
- NP EN ISO 6411** – *Desenhos técnicos. Representação simplificada de furos de centragem (ISO 6411:1982).* IPQ.
- NP EN ISO 6412-1** – *Desenhos técnicos. Representação simplificada de tubagens. Parte 1: Regras gerais e representação ortogonal (ISO 6412-1: 1989).* IPQ.
- NP EN ISO 6412-2** – *Desenhos técnicos. Representação simplificada de tubagens. Parte 2: Projecção isométrica (ISO 6412-2:1989).* IPQ.
- NP EN ISO 6412-3** – *Desenhos técnicos. Representação simplificada de tubagens. Parte 3: Acessórios para os sistemas de ventilação e de drenagem (ISO 6412-3:1993).* IPQ.
- NP ISO 13444** – *Documentação técnica de produtos (TPD). Cotagem e indicação de recartilhados.* IPQ.



- EN ISO 14660-2** – *Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical features – Part 2: Extracted median line of a cylinder and a cone, extracted median surface, local size of an extracted feature* (ISO 14660-2:1999). CEN
- NP ISO 15786** – *Desenhos técnicos. Representação e cotação simplificadas de furos*. IPQ.

As normas da série ISO 128 cobrem os assuntos gerais da representação de elementos.

### 3.3.2.13 Representação de elementos mecânicos

As convenções utilizadas para a representação de elementos mecânicos (componentes) deverão estar em conformidade com as seguintes normas, quando adequadas:

- NP EN ISO 2162-1** – *Documentação técnica de produtos. Molas. Parte 1: Representação simplificada* (ISO 2162-1:1993). IPQ.
- NP EN ISO 2162-2** – *Documentação técnica de produtos. Molas. Parte 2: Apresentação de dados técnicos de molas de compressão helicoidais cilíndricas* (ISO 2162-2:1993). IPQ.
- NP EN ISO 2203** – *Desenhos técnicos. Representação convencional de engrenagens* (ISO 2203:1973). IPQ.
- NP EN ISO 5845-1** – *Desenhos técnicos. Representação simplificada de ligações de peças por meio de elementos de fixação. Parte 1: Princípios gerais* (ISO 5845-1:1995). IPQ.
- ISO 5845-2** – *Technical drawings – Simplified representation of the assembly of parts with fasteners – Part 2: Rivets for aerospace equipment*. ISO.
- NP EN ISO 6410-1** – *Desenhos técnicos. Roscas e peças roscadas. Parte 1: Convenções gerais* (ISO 6410-1:1993). IPQ.
- NP EN ISO 6410-2** – *Desenhos técnicos. Roscas e peças roscadas. Parte 2: Implantes roscados* (ISO 6410-2:1993). IPQ.
- NP EN ISO 6410-3** – *Desenhos técnicos. Roscas e peças roscadas. Parte 3: Representação simplificada* (ISO 6410-3:1993). IPQ.
- NP EN ISO 6413** – *Desenhos técnicos. Representação de elementos estriados* (ISO 6413:1988). IPQ.
- NP EN ISO 8826-1** – *Desenhos técnicos. Rolamentos. Parte 1: Representação simplificada geral* (ISO 8826-1:1989). IPQ.
- NP EN ISO 8826-2** – *Desenhos técnicos. Rolamentos. Parte 2: Representação simplificada particular* (ISO 8826-2:1994). IPQ.
- NP EN ISO 9222-1** – *Desenhos técnicos. Juntas de vedação para aplicação dinâmica. Parte 1: Representação simplificada geral* (ISO 9222-1:1989). IPQ.
- NP EN ISO 9222-2** – *Desenhos técnicos. Juntas de vedação para aplicação dinâmica. Parte 2: Representação simplificada particular* (ISO 9222-2:19989). IPQ.
- NP EN ISO 26909** – *Molas. Vocabulário* (ISO 26909:2009). IPQ.

As normas da série ISO 128 cobrem os assuntos gerais da representação de elementos mecânicos.

### 3.3.2.14 Cotação e toleranciamento

As normas que estabelecem as regras e os procedimentos fundamentais para a cotação e toleranciamento de peças e produtos são designadas como normas GPS fundamentais, ver o ISO/TR 14638. Neste relatório, esta tipologia de normas incluía apenas o seguinte documento:

- EN ISO 8015** – *Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals – Concepts, principles and rules* (ISO 8015:2011). CEN.

No entanto, com a publicação da norma ISO 14638:2015, em substituição do ISO/TR 14638, em que o tipo de normas GPS “globais” foi eliminado, algumas dessas normas passaram a ser reclassificadas como normas GPS “fundamentais”.

A cotação e o toleranciamento deverão estar em conformidade com as seguintes normas, quando adequadas:

<b>NP ISO 129-1</b>	– <i>Desenhos técnicos. Indicação de cotas e tolerâncias. Parte 1: Princípios gerais.</i> IPQ.
<b>ISO 129-4</b>	– <i>Technical product documentation (TPD) – Indication of dimensions and tolerances – Part 4: Dimensioning of shipbuilding drawings.</i> ISO.
<b>EN ISO 286-1</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits</i> (ISO 286-1: 2010). CEN.
<b>EN ISO 286-2</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts</i> (ISO 286-2: 2010). CEN.
<b>EN ISO 14405-1</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 1: Linear sizes</i> (ISO 14405-1:2010). CEN.
<b>EN ISO 14405-2</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 2: Dimensions other than linear sizes</i> (ISO 14405-1: 2011). CEN.
<b>EN ISO 1119</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Series of conical tapers and taper angles</i> (ISO 1119: 2011). CEN.
<b>NP EN ISO 1660</b>	– <i>Desenhos técnicos. Cotação e toleranciamento de perfis</i> (ISO 1660:1987). IPQ.
<b>EN ISO 2538-1</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Wedges – Part 1: Series of angles and slopes</i> (ISO 2538-1:2014). CEN.
<b>EN ISO 2538-2</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Wedges – Part 2: Dimensioning and tolerancing</i> (ISO 2538:1998). CEN.
<b>EN ISO 3040</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Dimensioning and tolerancing – Cones</i> (ISO 3040:2009 + DAM 1:2014). CEN.
<b>NP ISO 13715</b>	– <i>Desenhos técnicos. Arestas de forma não definida. Vocabulário e indicações</i> (ISO 13715:2000). IPQ.

#### 3.3.2.15 Toleranciamento geométrico

O toleranciamento geométrico deverá estar em conformidade com as seguintes normas, quando adequadas:

<b>EN ISO 1101</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out</i> (ISO 1101:2012 + Cor 1:2013). CEN.
<b>EN ISO 2692</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing - Maximum material requirement (MMR), least material requirement (LMR) and reciprocity requirement (RPR)</i> (ISO 2692:2006). CEN.
<b>EN ISO 5458</b>	– <i>Geometrical Product Specification (GPS) – Geometrical tolerancing – Positional tolerancing</i> (ISO 5458:1998). CEN.
<b>EN ISO 5459</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum systems</i> (ISO 5459:2011). CEN.
<b>NP EN ISO 7083</b>	– <i>Desenhos técnicos. Símbolos para toleranciamento geométrico. Proporções e dimensões</i> (ISO 7083: 1983). IPQ.
<b>EN ISO 10579</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Dimensioning and tolerancing – Non-rigid parts</i> (ISO 10579:2010 + Cor 1:2011). CEN.
<b>EN ISO 12180-1</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Cylindricity – Part 1: Vocabulary and parameters of cylindrical form</i> (ISO 12180-1: 2011). CEN.

<b>EN ISO 12180-2</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Cylindricity – Part 2: Specification operators</i> (ISO 12180-2: 2011). CEN.
<b>EN ISO 12181-1</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Roundness – Part 1: Vocabulary and parameters of roundness</i> (ISO 12181-1: 2011). CEN.
<b>EN ISO 12181-2</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Roundness – Part 2: Specification operators</i> (ISO 12181-2: 2011). CEN.
<b>EN ISO 12780-1</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Straightness – Part 1: Vocabulary and parameters of straightness</i> (ISO 12780-1: 2011). CEN.
<b>EN ISO 12780-2</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Straightness – Part 2: Specification operators</i> (ISO 12780-2: 2011). CEN.
<b>EN ISO 12781-1</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Flatness – Part 1: Vocabulary and parameters of flatness</i> (ISO 12781-1: 2011). CEN.
<b>EN ISO 12781-2</b>	– <i>Geometrical product specifications (GPS) – Flatness – Part 2: Specification operators</i> (ISO 12781-2: 2011). CEN.
<b>ISO 14660-1</b>	– <i>Geometrical Product Specification (GPS) – Geometrical features – Part 1: General terms and definitions</i> . ISO (anulada em 2012).
<b>EN ISO 14660-2</b>	– <i>Geometrical Product Specification (GPS) – Geometrical features – Part 2: Extracted median line of a cylinder and cone, extracted median surface, local size of an extracted feature</i> (ISO 14660-2:1999). CEN

### 3.3.2.16 Materiais e processos tecnológicos

As especificações geométricas deverão estar em conformidade com as seguintes normas, quando apropriadas:

<b>EN ISO 2553</b>	– <i>Welding and allied processes – Symbolic representation on drawings – Welded joints</i> (ISO 2553:2013). CEN.
<b>EN 22768-1</b>	– <i>General tolerances – Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications</i> (ISO 2768-1:1989). CEN.
<b>EN 22768-2</b>	– <i>General tolerances – Part 2: Geometrical tolerances for features without individual tolerance indications</i> (ISO 2768-2:1989). CEN.
<b>NP EN ISO 6414</b>	– <i>Desenhos técnicos de vidraria</i> (ISO 6414:1982). IPQ.
<b>EN ISO 8062-1</b>	– <i>Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts – Part 1: Vocabulary</i> (ISO 8062-1:2007). CEN.
<b>CEN ISO/TS 8062-2</b>	– <i>Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts – Part 2: Rules</i> (ISO/TS 8062-2:2013). CEN.
<b>EN ISO 8062-3</b>	– <i>Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts – Part 3: General dimensional and geometrical tolerances and machining allowances for castings</i> (ISO 8062-3:2007). CEN.
<b>EN ISO 10135</b>	– <i>Technical product documentation (TPD) – Drawing indications for moulded parts</i> (ISO 10135:2007). CEN.
<b>NP EN ISO 13920</b>	– <i>Soldadura. Tolerâncias gerais para construção soldada. Dimensões para comprimentos e ângulos – Forma e posição</i> (ISO 13920:1996). IPQ.
<b>NP EN ISO 15785</b>	– <i>Desenhos técnicos. Representação simbólica e indicação de juntas coladas, dobradas e prensadas</i> (EN ISO 15785:2002 IDT). IPQ.
<b>NP ISO 15787</b>	– <i>Documentação técnica de produtos. Peças ferrosas tratadas termicamente. Representação e indicações</i> (ISO 15787:2001 IDT). IPQ.

### 3.3.2.17 Indicação do estado de superfície

A indicação do estado de superfície deverá estar em conformidade com:

- EN ISO 1302** – *Geometrical Product Specification (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation* (ISO 1302:2002). CEN.

A aplicação correta da EN ISO 1302 requer a utilização das seguintes normas:

- EN ISO 8785** – *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface imperfections – Terms, definitions and parameters* (ISO 8785:1998). CEN.
- EN ISO 3274** – *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* (ISO 3274:1996). CEN.
- EN ISO 4287** – *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters* (ISO 4287:1997). CEN.
- EN ISO 4288** – *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture* (ISO 4288:1996). CEN.
- EN ISO 11562** – *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters* (ISO 11562:1996) (anulada em 2011-05-27 e substituída pela ISO 16610-21:2011). ISO.
- EN ISO 12085** – *Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Profile method – Motif parameters* (ISO 12085:1996). CEN.
- EN ISO 13565-1** – *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; surfaces having stratified functional properties – Part 1: Filtering and general measurement conditions* (ISO 13565-1:1996). CEN.
- EN ISO 13565-2** – *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; surfaces having stratified functional properties – Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve* (ISO 13565-2:1996). CEN.
- EN ISO 13565-3** – *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; surfaces having stratified functional properties – Part 3: Height characterization using the material probability curve* (ISO 13565-3:1998). CEN.

### 3.3.2.18 Segurança, armazenamento e recuperação de documentação

Muitas especificações técnicas de produtos têm, apenas, requisitos de segurança mínimos, para além dos proporcionados pelos procedimentos gerais de gestão e armazenamento. No entanto, se for identificada uma necessidade específica para um dado nível geral de segurança, deverão ser satisfeitos os requisitos a seguir indicados.

Os procedimentos gerais para garantir a segurança da documentação técnica de produtos (TPD) e da especificação técnica de produtos (TPS) deverão estar em conformidade com:

- NP EN ISO 11442** – *Documentação técnica de produtos. Gestão de documentos* (ISO 11442:2006). IPQ.

O nível de segurança atribuído a uma dada especificação técnica de produtos (TPS) deverá estar claramente identificado através de uma marca adequada, colocada junto do título ou da legenda de toda a documentação técnica de produtos (TPD) que constitui a TPS.

Os métodos para o armazenamento e a recuperação dos documentos deverão estar em conformidade com as seguintes normas, quando apropriadas:

- NP EN ISO 6428** – *Desenhos técnicos. Requisitos para microfilmagem* (ISO 6428:1982). IPQ.
- NP EN ISO 11442** – *Documentação técnica de produtos. Gestão de documentos* (ISO 11442:2006). IPQ.
- NP ISO 15226** – *Documentação técnica de produtos. Modelos de ciclo de vida e afetação de documentos*. IPQ.

### 3.3.2.19 Menções de proteção

Se for necessário colocar restrições à utilização de documentação técnica de produtos, deverão ser aplicadas as recomendações constantes da seguinte norma:

- NP ISO 16016** – *Documentação técnica de produtos. Menções de proteção utilizadas para documentos e produtos cujo uso é reservado*. IPQ.

### 3.3.3 Breves observações finais

No âmbito da preparação de Especificações técnicas de produtos (TPS), que funcionem como meios estáveis de comunicação ao nível do mercado global, a existência de normas nacionais relativas à definição, especificação e representação gráfica de produtos, idênticas às correspondentes normas internacionais (ISO) e europeias (EN), é essencial para se conseguir obter uma harmonização internacional entre as normas dos diferentes países. Neste contexto, a título de exemplo, merece ser feita uma referência particular à norma britânica BS 8888.

Através da análise dos documentos normativos referidos neste texto, pode constatar-se que, em Portugal, o trabalho que vem sendo desenvolvido pela Comissão técnica CT1 – “Desenho técnico” permitiu já assegurar que as normas portuguesas no domínio da Documentação técnica de produtos (TPD) estejam, na sua quase totalidade, em conformidade com as correspondentes normas ISO e EN, em contraste com a ausência de qualquer trabalho significativo no domínio da Especificação geométrica de produtos (GPS).

No nosso país, é cada vez maior o número de empresas que se confrontam com a necessidade de dispor de competências próprias no domínio do desenvolvimento de produtos, de modo a poderem ser competitivas ao nível do mercado global. Só com o conhecimento e aplicação das normas nos domínios GPS e TPD, harmonizadas internacionalmente, é possível estabelecer um sistema de Especificação técnica de produtos (TPS) adequado ao contexto internacional, que permita otimizar a atribuição de recursos entre a especificação, a fabricação e a verificação.

## 3.4 A documentação técnica elaborada ao longo do processo de desenvolvimento do produto

O **desenvolvimento do produto** pode ser definido como o conjunto completo de atividades, dentro do ciclo de vida do produto, que começa com uma necessidade e uma ideia de produto e termina com o início da sua produção em série para o mercado.

Em processos de desenvolvimento de produto bem-sucedidos, começa-se por transformar os **requisitos definidos pelo cliente** em **especificações funcionais** e, seguidamente, em **especificações de conceção detalhadas**. Genericamente falando, a função de um produto está dependente da geometria, das propriedades dos materiais e das condições de operação deste. O fornecedor do produto pode não ter muito controlo sobre as condições de operação, mas tem controlo sobre a geometria e as propriedades dos materiais.

As **atividades** desenvolvidas durante o **processo de desenvolvimento do produto** podem ser divididas em: **análise**, **estudo conceptual** (*"conceptual design"*), **conceção de base** (*"basic design"*) e **conceção detalhada** (*"detail design"*), ver figura 3.22.

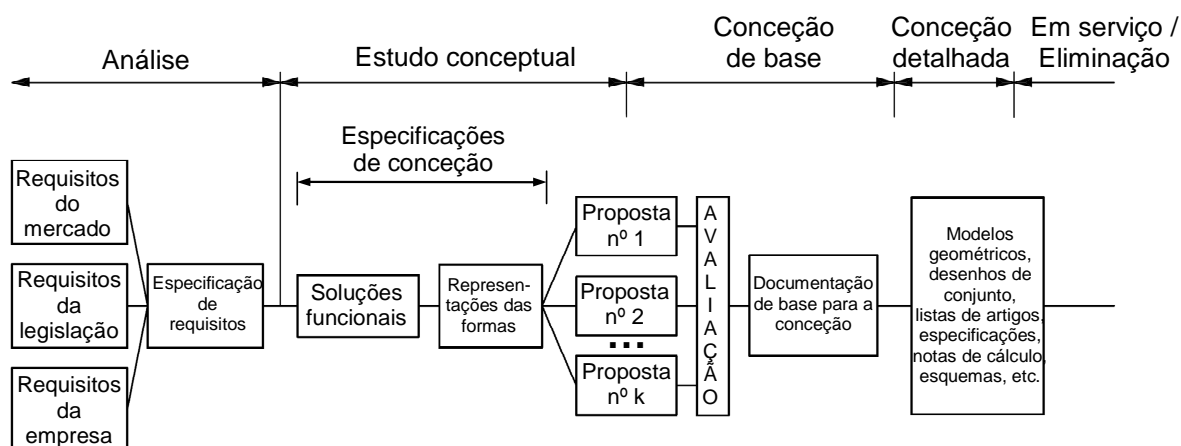


Figura 3.22 – Processo de desenvolvimento do produto (EN ISO 11442)

Em cada uma destas atividades vão sendo elaborados diversos **tipos de documentos técnicos** [A1], tais como especificações, esquemas, modelos geométricos, desenhos, listas, folhas de cálculo, instruções, planos, relatórios etc., com vista a permitir a comunicação e o entendimento entre todas as partes envolvidas nas diferentes fases do processo de desenvolvimento do produto.

Normalmente, neste processo começa-se por fazer uma **análise** que engloba a preparação de uma **especificação de requisitos** (*"requirement specification"*) do produto (ver figuras 3.22 e 3.23), a partir da compilação e avaliação dos requisitos relativos ao mercado, à legislação e à própria empresa.

Os **requisitos relativos ao mercado** são, por exemplo, os requisitos funcionais, de ambiente, de serviço e de preço. A documentação dos requisitos relativos ao mercado deve assegurar que o produto certo é produzido no momento certo.

Os **requisitos relativos à legislação** são, por exemplo, os requisitos de aprovação, de segurança, ou de reciclagem. A documentação dos requisitos relativos à legislação deve assegurar que o produto possa vir a ser aprovado.

Os **requisitos relativos à empresa** são, por exemplo, os requisitos da empresa relacionados com a estratégia, a conceção, o processo produtivo e os custos. A documentação dos requisitos relativos à empresa deve assegurar que o produto esteja em conformidade com as normas da empresa e possa ser produzido de modo que os processos ou métodos de fabrico aceites e/ou conhecidos sejam tidos em consideração.

Dep. responsável	Referência técnica	Tipo de documento		Estado de documento	
ABC 2	Patricia Johnson	Especificação de requisitos		Publicado	
Prop. legal	Criado por	Título, Título complementar		AB123 456-7	
	Aprovado por	Equipamento de abastecimento de ar		Rev. A	Folha 1
	David Brown				

1	Introdução.....	2
1.1	Cliente.....	2
2	Objetivo e campo de aplicação.....	2
2.1	Veículo.....	2
2.2	Âmbito de entrega.....	3
3	Requisitos externos.....	3
4	Requisitos de hardware.....	3
4.1	Sub-sistemas.....	4
4.1.1	Compressor de ar principal.....	4
4.2	Mecânica.....	4
4.2.1	Disposição geral e implantação.....	4
4.2.2	Requisitos mecânicos gerais.....	4
4.3	Eletrotécnica.....	5
4.3.1	Disposições gerais.....	5
4.3.2	Dados de tensão da bateria.....	6
5	Requisitos funcionais.....	6
5.1	Módulo de abastecimento de ar.....	6
5.2	Desempenho do modelo de abastecimento de ar.....	6
5.3	Suspensão secundária.....	7
6	RAM e manutenção.....	7
6.1	Fiabilidade.....	7
6.1.1	Definições de FR.....	8
6.2	Manutenção e manutenibilidade.....	8
7	Conceção para meio ambiente.....	8
8	Legislação e segurança.....	9
8.1	Segurança geral do sistema.....	9
8.2	Segurança contra incêndios.....	9
9	Ensaios.....	9
9.1	FAI.....	9
10	Referências.....	10
11	Histórico das revisões.....	11

Figura 3.23 – Exemplo de uma especificação de requisitos (NP ISO 29845)

Neste trabalho de compilação da informação pré-existente, necessária à preparação da especificação de requisitos do produto, devem ser tidos em conta os **documentos normativos nacionais, regionais e internacionais** pertinentes (normas, especificações técnicas, relatórios técnicos, etc.) que podem ser pesquisados, via internet, nos catálogos *on-line* disponíveis nos sítios dos Organismos Nacionais e Internacionais de Normalização relevantes.

Em seguida, tendo como ponto de partida a especificação de requisitos estabelecida, dá-se início ao **estudo conceptual** (“*conceptual design*”) com a preparação e o estabelecimento de **especificações de conceção** (“*design specifications*”) que servirão como uma base para posteriores desenvolvimentos. Estas poderão indicar possíveis soluções funcionais e/ou representações das formas que irão servir de base para uma ou mais **propostas de conceção** (“*design proposals*”) a avaliar.

Nas **soluções funcionais** ("*functional solutions*"), as funções e relações entre partes são descritas como soluções de princípio, normalmente sob a forma de texto (notas, etc.) e de esquemas (ver exemplos na figura 3.24).

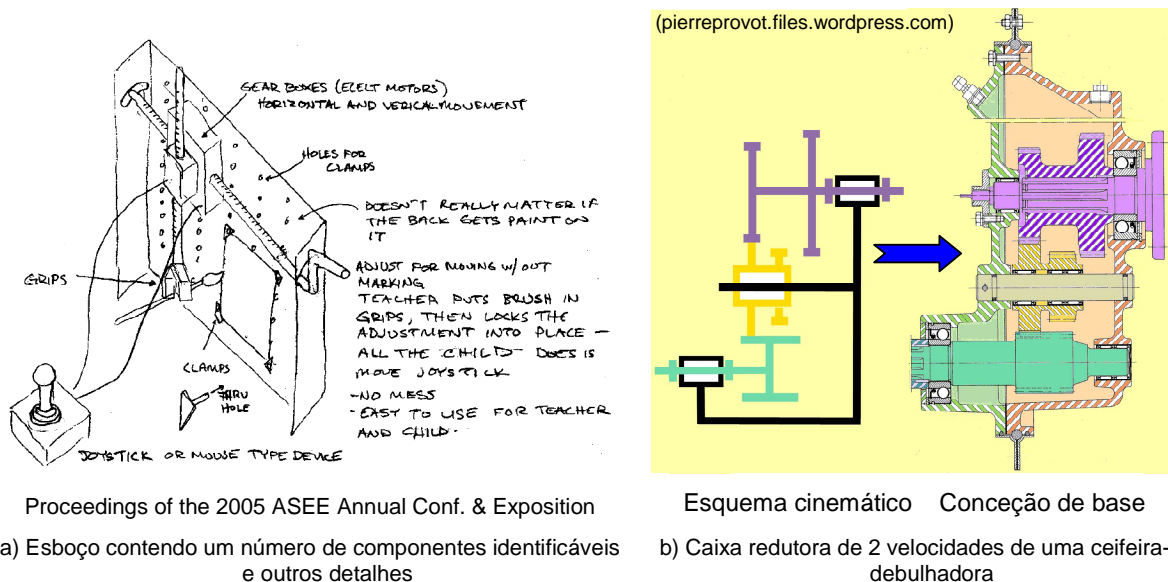


Figura 3.24 – Exemplos de apresentações de soluções funcionais

Nas **representações das formas** ("*shape representations*"), a forma física é normalmente apresentada por desenhos conceptuais ou modelos geométricos, tais como modelos de estilo ("*styling models*") (ver exemplos na figura 3.25).

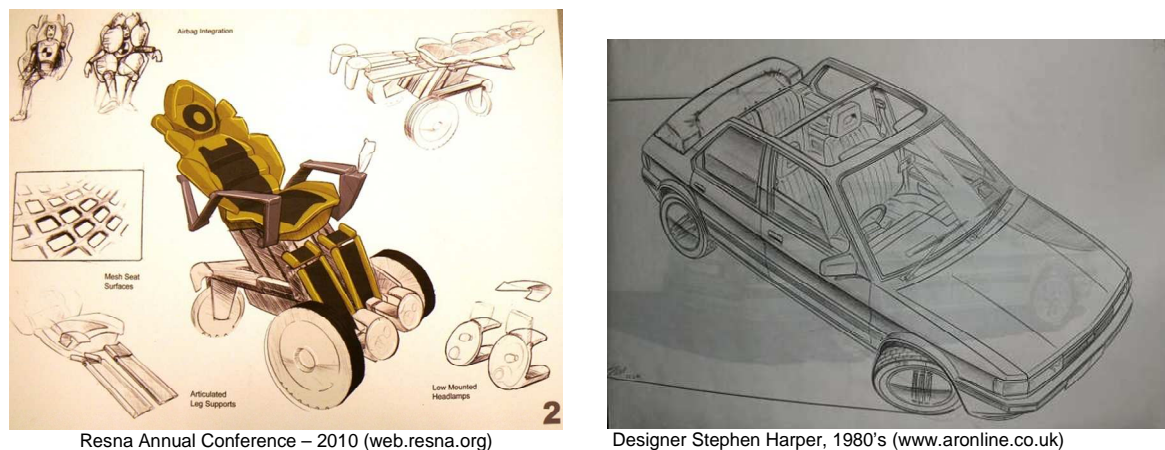


Figura 3.25 – Exemplos de representações das formas

O estudo conceptual é um processo iterativo que consiste numa série de **estádios generativos** (geradores de formas) e de **avaliação** que convergem progressivamente para uma solução conceptual preferencial (ver figura 3.22). Em cada iteração, os **conceitos** (componente, subsistema ou produto global) são definidos com um detalhe crescente, o que permite efetuar a sua avaliação cada vez com mais rigor. Assim, por exemplo, um conceito que começa por um esboço ("*sketch*")

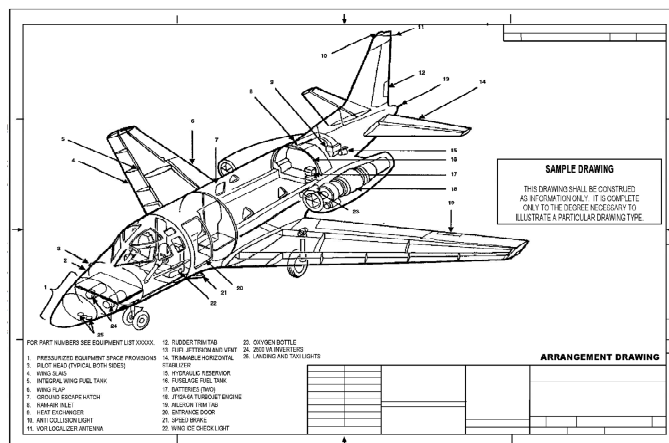


grosseiro [ver exemplo, na figura 3.24 a)] poderá ser desenvolvido, através de várias iterações, possivelmente até a um desenho de disposição (“*layout drawing*”) à escala e a um modelo ou maquete à escala 1:1 (“*mock-up*”) [11].

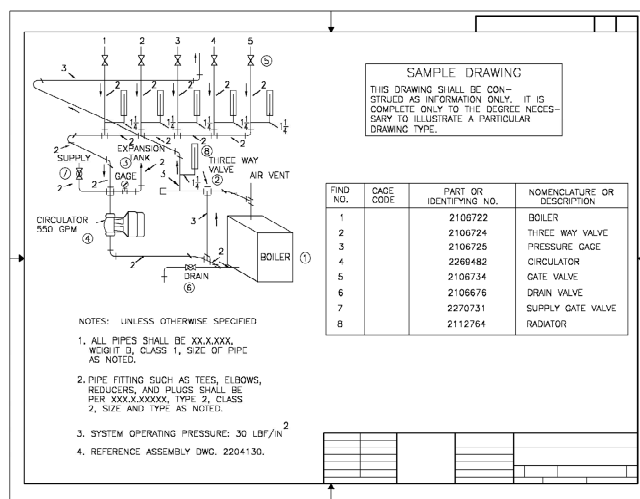
À medida que esta fase se desenvolve, a confiança na capacidade do(s) conceito(s) para satisfazer a **especificação de requisitos do produto** (“*product requirement specification*”) previamente estabelecida e, eventualmente, para produzir uma solução válida vai aumentando. O nível de detalhe da engenharia aplicada a um conceito, antes de este ser “adotado”, deverá ser suficiente para permitir uma avaliação rigorosa e realista do mesmo. Como este processo é muitas vezes moroso, poderá haver uma tendência para o abreviar em demasia, o que corresponderá à adoção de um conceito sem este ter sido completamente avaliado. Esta tendência deve ser combatida, pois aumenta a probabilidade de vir a ser “adotado” um conceito fraco ou imperfeito. As implicações daí decorrentes, em termos do aumento de custos e da redução da qualidade do desempenho do produto, sobrepõem-se às poupanças em tempo e trabalho conseguidas na fase de estudo conceptual. A título de exemplo, a referência [11] assinala que, numa análise efetuada a projetos japoneses e europeus comparáveis, os japoneses dedicaram 66 % do esforço total de projeto ao estudo conceptual e 10 % à reformulação da conceção, enquanto os valores equivalentes para os projetos europeus foram, respetivamente, de 7 % e de 50 %.

O resultado da avaliação das diferentes propostas de conceção, desenvolvidas durante a fase de estudo conceptual, servirá de ponto de partida para a elaboração da **documentação de base para a conceção**, tendo em conta critérios de carácter técnico e económico. Não há, assim, um final bem definido para a fase de estudo conceptual, uma vez que o conceito aprovado vai continuar a ser gradualmente definido, com um detalhe cada vez maior, ao longo de uma nova fase designada de conceção de base (o anteprojecto), rumo à fase de conceção detalhada.

Na fase da **conceção de base** (“*basic design*”), o esforço de desenvolvimento concentrar-se-á numa única solução preferencial (a **proposta de conceção** aprovada) que, no final, virá a ser apresentada sob a forma de um conjunto de desenhos de conjunto/desenhos de disposição e esquemas (ver figura 3.26).



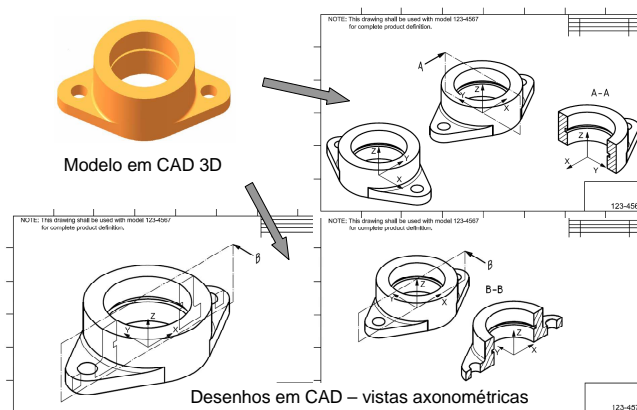
a) Desenho de disposição (perspético)



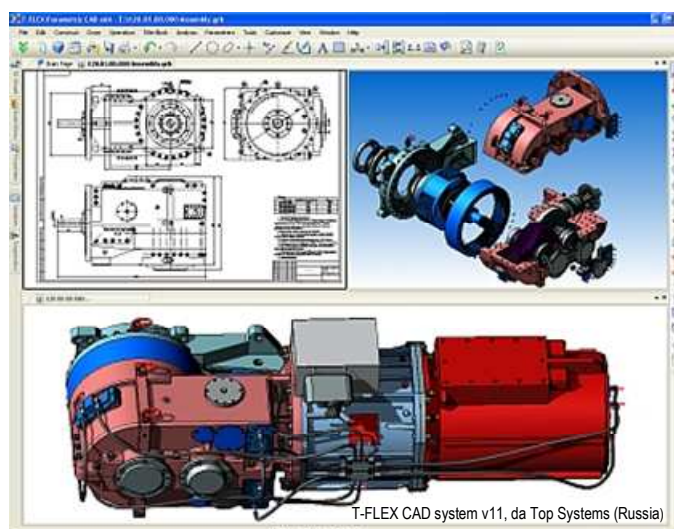
b) Desenho esquemático mecânico

Figura 3.26 – Exemplos de documentação de base para a concepção (ASME Y14.24)

Nesta fase, a geometria nominal de um **produto** – uma peça, um dispositivo mecânico ou uma máquina – é modelada por meio de sistemas de CAD 3D, podendo, em seguida, ser gerados os correspondentes desenhos 2D (ver exemplos, na figura 3.27).



a) Concepção de base de uma peça (ISO 16792)



b) Concepção de base de um conjunto

Figura 3.27 – Exemplos de documentação de base para a concepção

Na concepção de base dos produtos, deve ser adotado um conjunto de procedimentos que podem vir a ter um impacto muito significativo na satisfação das necessidades do mercado e nos custos de produção associados. As dimensões lineares principais, caracterizadoras de produtos pertencentes a uma dada gama de fabricação, devem ser selecionadas e escalonadas de acordo com uma das **séries de números normais (séries Renard)** (ISO 3, ISO 17 e ISO 497).

As dimensões lineares e angulares dos vários elementos geométricos constituintes das peças, cuja produção e/ou verificação dependam diretamente de ferramentas de corte e/ou de instrumentos de verificação (ver exemplos na figura 3.28), devem também ser escolhidas de entre valores de **séries de números preferenciais**.

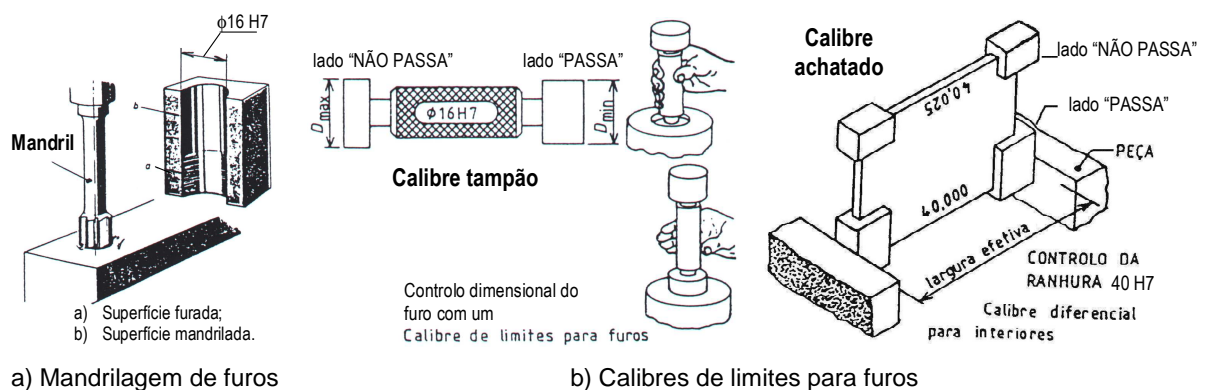


Figura 3.28 – Exemplos de normalização de ferramentas de corte e de instrumentos de verificação

Na concepção de base de sistemas mecânicos devem ser utilizados elementos de ligação e órgãos mecânicos de transmissão de movimento normalizados, tendo também em conta as dimensões requeridas para os seus alojamentos nos restantes componentes não normalizados.

Os modelos de sólidos, definidores da geometria nominal dos produtos, facilitam a sua visualização mas contêm também dados geométricos que podem ser utilizados em diversos sistemas de análise ao nível da engenharia, tais como o dimensionamento por elementos finitos, a análise térmica e das tensões, a geometria de massas, a verificação de eventuais interferências, etc.

Após a realização destes trabalhos de análise, os **dados da geometria nominal** são utilizados na concepção detalhada dos produtos, na elaboração de materiais de marketing e na produção de protótipos físicos através de meios de fabrico aditivo (*"additive manufacturing"*) [B2], num **ambiente de engenharia simultânea** (*"concurrent engineering"*) (ver figura 3.29).

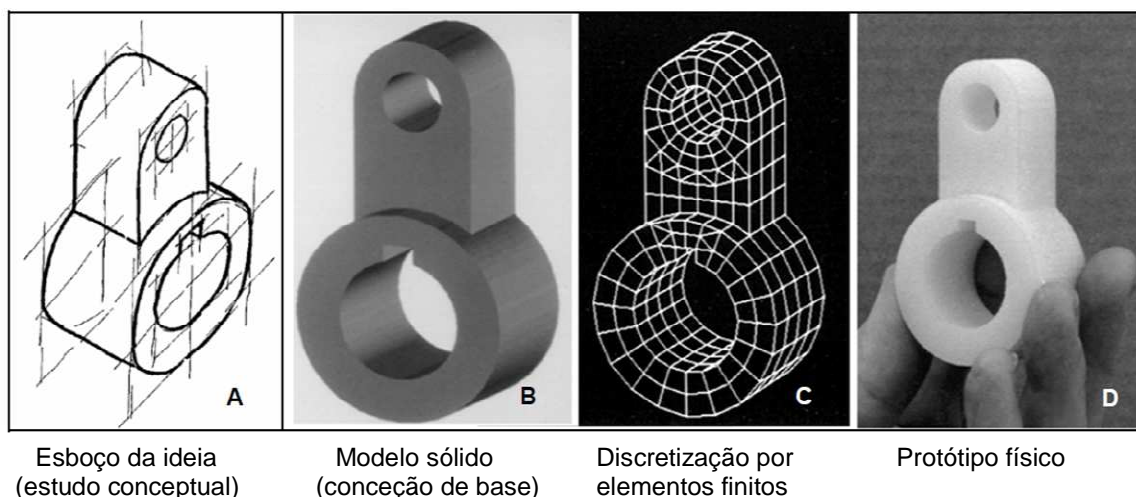


Figura 3.29 – Exemplos de atividades de desenvolvimento de um produto em ambiente de engenharia simultânea [B2]

Finalmente, durante a fase de **conceção detalhada** (“*detail design*”), os documentos (modelos geométricos, desenhos de conjunto, listas de artigos, especificações, notas de cálculo, esquemas, etc.) são concluídos, tendo em vista a sua utilização prevista, e formalizados de acordo com regras mais restritas da gestão documental (ver exemplos de definição de produto acabado, na figura 3.30).

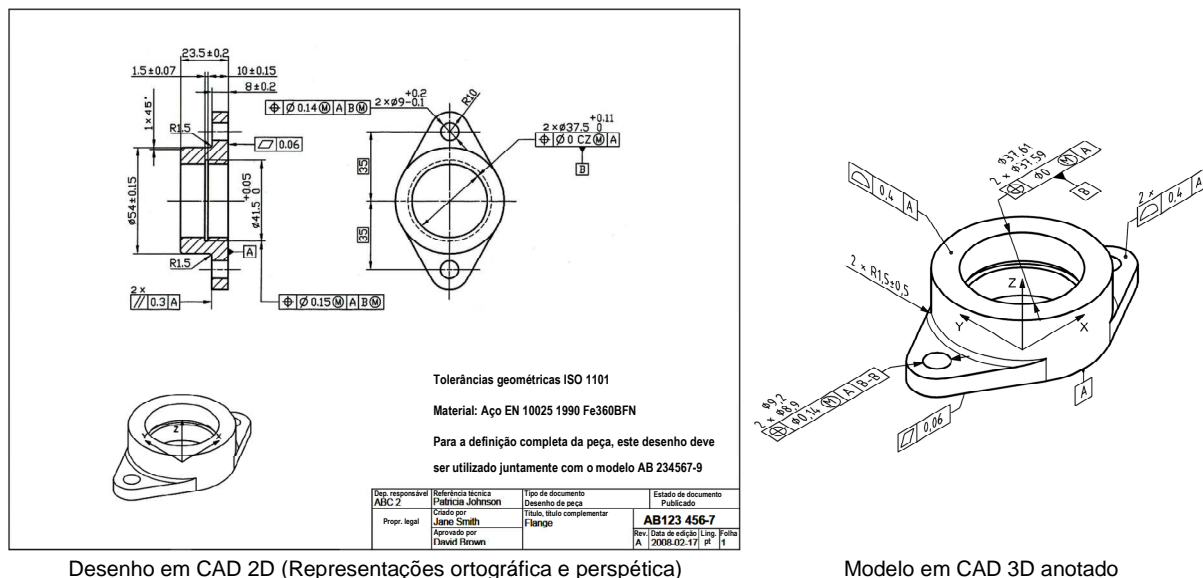


Figura 3.30 – Exemplos de documentos de conceção detalhada de uma peça (ISO 16792)

Estes documentos no âmbito da definição de produto acabado, fabricação, verificação, instalação, etc. fazem parte das **saídas** (“*outputs*”) do **processo de desenvolvimento do produto** e incluem, entre outros, dados que demonstram a comparação entre as *entradas* (“*inputs*”) e as *saídas* do processo; especificações de produto, incluindo critérios de aceitação; especificações do processo; especificações de materiais; especificações de ensaio; requisitos de formação; informação dos



“Desenho” em quatro disciplinas semestrais: “Desenho e Métodos Gráficos I e II”, no 1º ano, e “Desenho de Construção Mecânica I e II”, no 2º ano. Após a Revolução de abril de 1974, os dois anos preparatórios foram integrados na Faculdade de Engenharia (FEUP) que passou a lecionar integralmente, a partir de 1975/76, todos os diferentes cursos de Licenciatura em Engenharia da UP, então em vigor.

Nesse novo contexto, após a institucionalização dos diferentes Departamentos da FEUP, entre os quais o DEMec – Departamento de Engenharia Mecânica, em 1975, foi criada a Secção de Desenho Industrial (SDI), então com a denominação de Gabinete de Desenho (GD). De acordo com o Prof. Vasco Sá [S1], “as disciplinas de Desenho tiveram sempre, principalmente até aos fins da década de 90, uma grande importância no nosso Departamento, o que pode ser constatado pela escolaridade que lhes era dedicada e pelos meios que lhes eram consagrados”. Na criação, organização e desenvolvimento da SDI, merece ser registado o papel importante então desempenhado pelos Professores Guilherme Ricca Gonçalves (seu coordenador, até 1986) e José Simões Morais (seu coordenador, até 1998).

O Prof. Guilherme Ricca Gonçalves tinha sido docente da Faculdade de Ciências da UP, desde 1944, onde regeu as disciplinas de Desenho e, mais tarde, de Geometria descritiva. Promoveu o Desenho técnico moderno, que então começava a estruturar-se, no Ensino universitário. Participou num grupo de trabalho que elaborou textos de diversas normas, no âmbito da Comissão Portuguesa de Normalização, tendo integrado ainda a Representação Portuguesa à Conferência ISO, realizada em Turim, em 1961. Após 1974, foi responsável pela orientação de disciplinas de Desenho e Geometria na FEUP, até 1988, ano em que se jubilou. Produziu diversos textos de Desenho técnico e de Geometria descritiva, tendo parte deles sido utilizada noutras Escolas do ensino superior, e foi autor do livro “Geometria Descritiva” [R1].

O Prof. José Simões Morais tinha sido professor efetivo do Ensino técnico, entre 1956 e 1968, e docente da Faculdade de Ciências da UP, entre 1970 e 1974, tendo lecionado diversas disciplinas na área do Desenho técnico. Na SDI, desde 1975, regeu disciplinas de Desenho técnico e de Desenho de construção mecânica e, mais tarde, de Geometria descritiva, tendo sido responsável pela orientação de disciplinas de Desenho e Geometria, a cargo da SDI, em vários cursos de licenciatura, até 1998, ano em que se jubilou. Elaborou diversos textos de Desenho técnico, Desenho de construção mecânica e Geometria descritiva [S4], e é autor dos livros “Desenho Básico 1” [S5] e “Desenho Técnico Básico 3” [S6]. Participou na redação do Programa de Geometria Descritiva A e B (1999), a convite do Departamento do Ensino Secundário (DES) do Ministério da Educação e promoveu e colaborou na realização de diversos cursos intensivos e ações de formação em Desenho técnico. Atualmente, é ainda o responsável do Organismo de Normalização Setorial (ONS-INEGI), nos domínios do Desenho técnico e dos Elementos de ligação mecânicos, e presidente das Comissões Técnicas Portuguesas de Normalização CT 1 – “Desenho técnico” e CT 9 – “Elementos de ligação mecânicos”.

No arranque e no desenvolvimento das atividades da SDI, ao longo dos anos, estes professores foram coadjuvados por um conjunto de assistentes, contratados à medida que tal se mostrou necessário para esse efeito, tendo alguns deles prosseguido uma carreira académica neste domínio ou em domínios afins. Na 2ª metade da década de 70, o grande desafio colocado à SDI foi a elaboração e a estruturação de novos conteúdos para as disciplinas de “Desenho e Métodos Gráficos I” (Geometria descritiva), “Desenho e Métodos Gráficos II” (Desenho técnico) e “Desenho de Construção Mecânica I e II” da Licenciatura em Engenharia Mecânica (LEM).

A **Geometria descritiva** (“Método de Monge”) foi sempre lecionada com a supressão da “linha de terra” (melhor designada atualmente por “aresta do diedro”), uma vez que, na resolução da maioria dos problemas, não há interesse em fixar as posições dos planos frontal e horizontal de projeção. Esta abordagem tem em consideração que o Desenho técnico, que deriva diretamente do Método de Monge, não necessita de recorrer à representação da linha de terra [R1]. Posteriormente, a partir de 1991/92, a “Representação axonométrica ortogonal” passou também a fazer parte do programa [S4], até à retirada definitiva da disciplina de “Geometria Descritiva” do plano de estudos da LEM, em 1997/98.

O **Desenho técnico** (DT) passou a ser abordado, fundamentalmente, com base na normalização ISO [S6, A2], sendo dada uma ênfase particular ao desenvolvimento de duas competências fundamentais:

- A aquisição de bons conhecimentos sobre a representação de objetos, em termos da sua geometria e dimensões nominais, feita a partir da execução de desenhos em representação ortográfica de objetos apresentados em representação perspetiva (ver exemplo na figura 3.32).

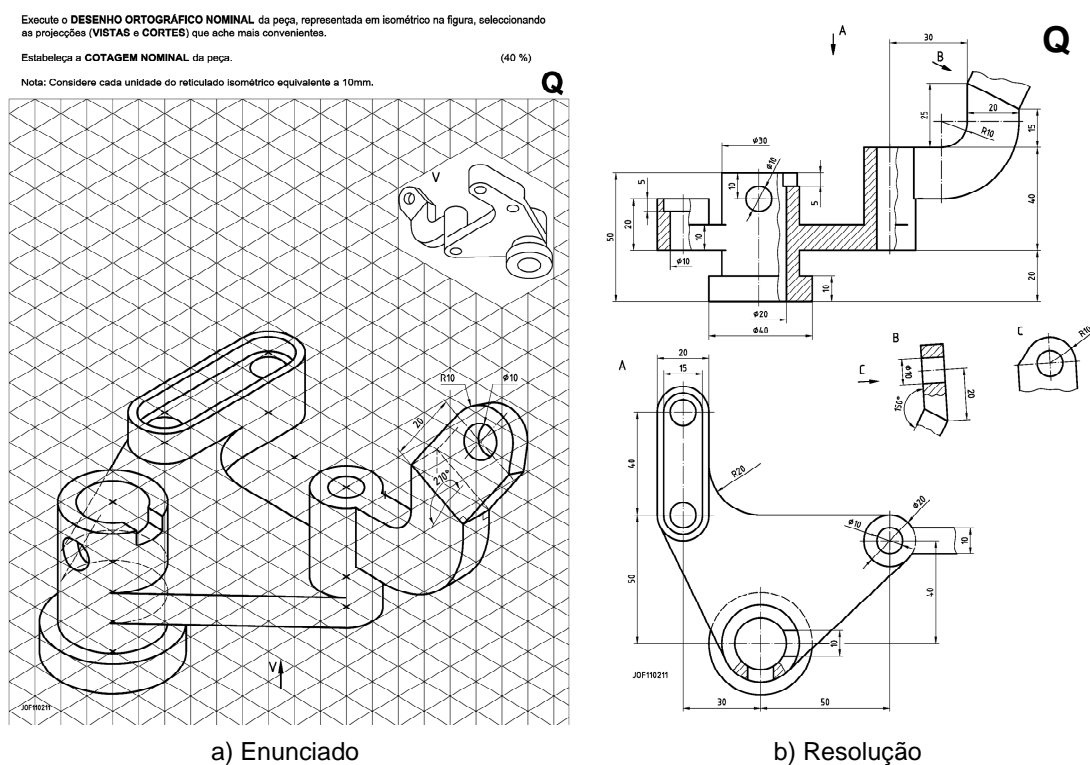


Figura 3.32 – Exemplo do desenho de uma peça elaborado em representação ortográfica com cotagem nominal



Estes exercícios de representação mais conveniente de objetos têm uma componente formativa muito importante para futuros engenheiros, uma vez que são “problemas abertos” que admitem várias soluções alternativas, obrigando os estudantes a exercitarem a sua capacidade para fazerem escolhas, tendo em conta as várias opções de que dispõem, conducentes à solução a adotar.

- b) O desenvolvimento das capacidades de visualização espacial e de comunicação técnica, com base na elaboração de representações perspéticas isométricas de objetos, a partir da leitura dos respetivos desenhos em representação ortográfica (ver exemplo na figura 3.33).

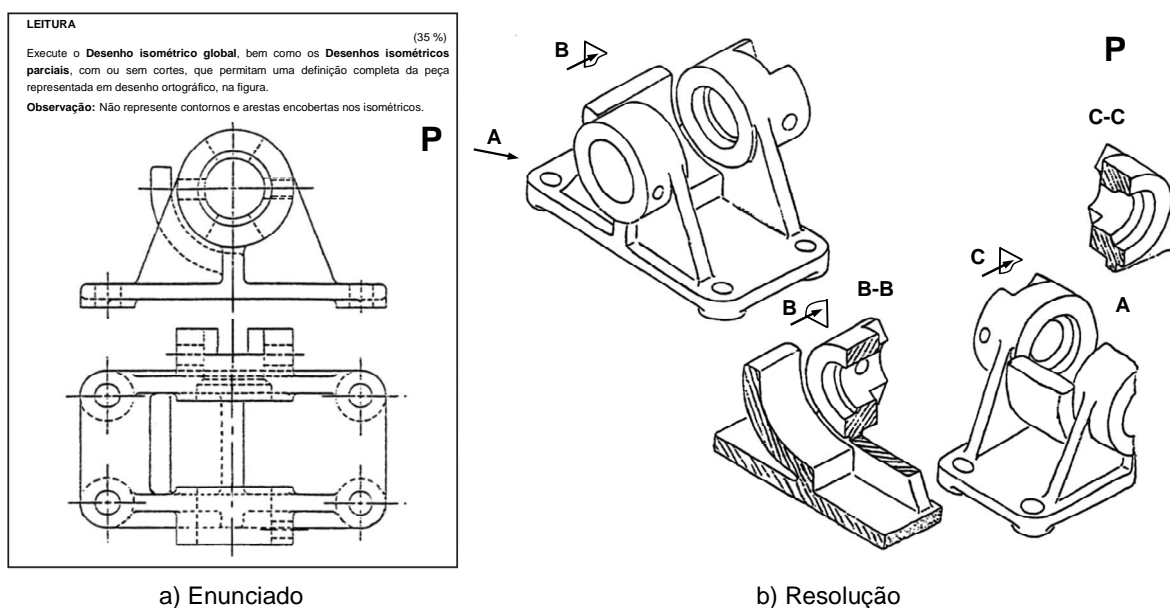


Figura 3.33 – Exemplo do desenho de uma peça elaborado em representação perspética isométrica

Atualmente, para poderem abordar estes dois tipos de desenhos, os estudantes devem possuir bons conhecimentos sobre os conteúdos das normas de “Documentação técnica de produtos” (TPD), sobretudo as das séries ISO 5456 – “*Projection methods*”, ISO 128 – “*General principles of presentation*” e ISO 129 – “*Indication of dimensions and tolerances*”. Ambos os tipos de desenhos são executados, por meio de traçado manual, em folhas de papel, normalmente dispostas sobre grelhas quadriculadas ou de reticulado isométrico, de acordo com os casos em apreço.

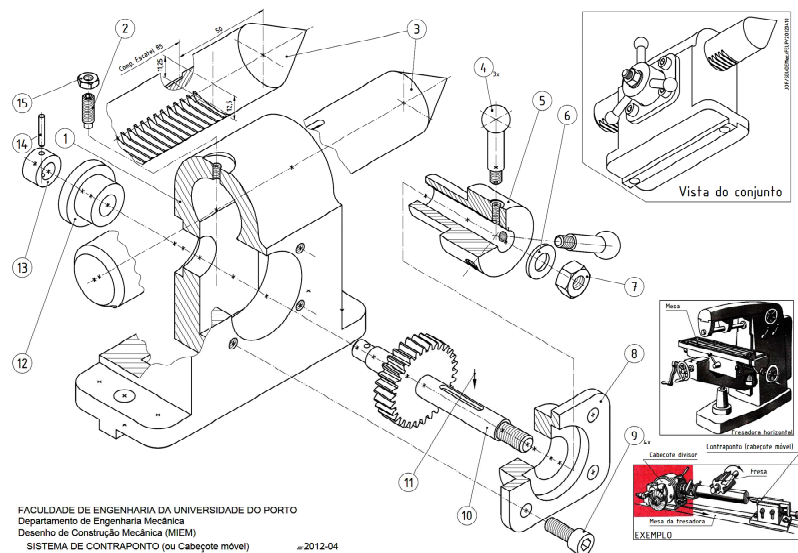
As aulas de **Desenho de construção mecânica** (DCM) foram sendo estruturadas com base numa apresentação desenvolvida de conceitos relativos aos “Sistemas e componentes mecânicos normalizados de utilização corrente” e aos “Toleranciamentos dimensionais e geométricos e indicação dos estados de superfície”, estes últimos conteúdos presentemente englobados na “Especificação geométrica de produtos” (GPS) [S6, A3], de modo que os estudantes pudessem atingir os seguintes objetivos específicos:

- Aperfeiçoamento das capacidades de visualização espacial e de comunicação técnica.
- Primeira abordagem ao desenho de conceção de base.

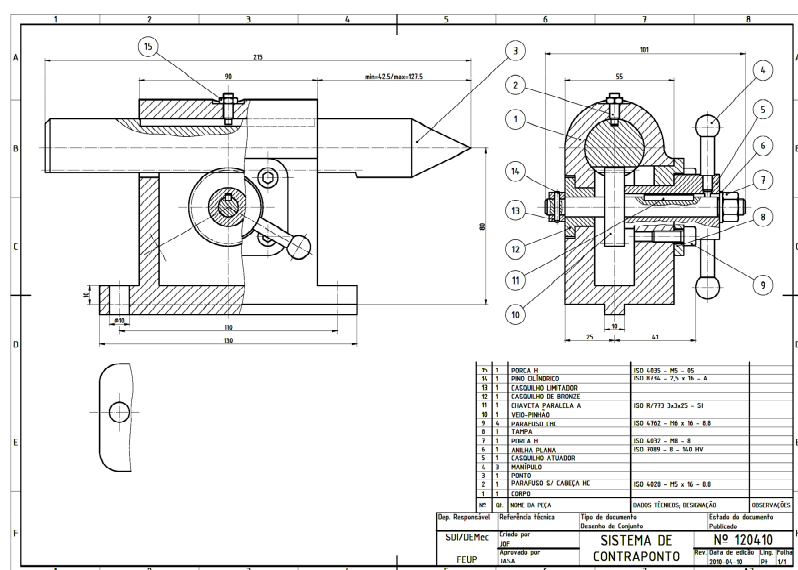


- c) Introdução à análise funcional de mecanismos com a execução de desenhos de definição de produto acabado de alguns componentes.
- d) Desenvolvimento da capacidade para estabelecer relações entre as fases de conceção, definição e fabricação.

A abordagem inicial ao desenho de conceção de base é realizada a partir da elaboração de desenhos de conjunto em representação ortográfica e suas correspondentes listas de peças, incluindo a seleção dos elementos mecânicos normalizados. Os desenhos de conjunto em representação ortográfica podem ser executados com base em vistas explodidas (representações perspéticas de conjuntos, habitualmente em axonometria isométrica ampliada), à escala 1:1, ver exemplo na figura 3.34, complementadas por enunciados textuais anexos, ou a partir de uma análise de sistemas reais.



a) Enunciado fornecido em folha de formato A3

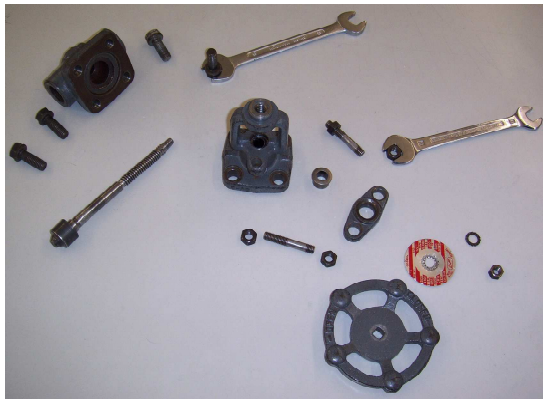


b) Resolução

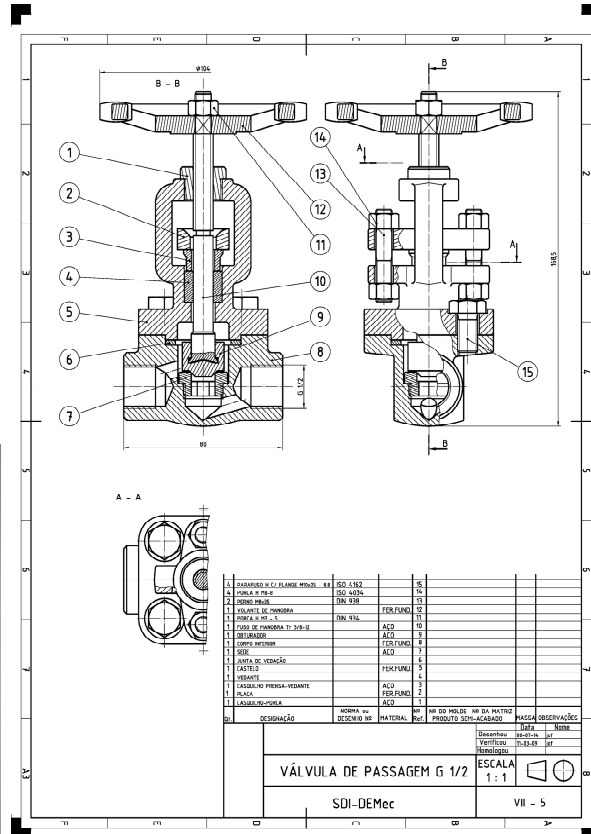
Figura 3.34 – Exemplo do desenho de conjunto de um sistema de contraponto (cabeçote móvel) elaborado em representação ortográfica



a) Válvula de passagem (de globo)



b) Desmontagem dos elementos componentes



c) Resolução: desenho de conjunto

Figura 3.34 – Exemplo do desenho de conjunto de uma válvula de passagem (de globo) elaborado em representação ortográfica, a partir da análise prévia do dispositivo real

Neste tipo de exercícios, deve começar-se por determinar qual a designação correta do dispositivo em presença e qual o seu objetivo funcional. Em seguida, passa-se ao estudo da configuração exterior do produto e à desmontagem sucessiva dos seus elementos componentes, verificando quais os que estão sujeitos a qualquer tipo de normalização. Nesta desmontagem, deve observar-se também o tipo de ligações que as peças têm entre si. Examinam-se as respetivas superfícies conjugadas e o seu acabamento, bem como os seus tipos de acoplamento (móvel ou fixo), procurando determinar os tipos de ajustamentos existentes.

Finalizado este estudo, passa-se ao traçado em esboço cotado de todos os elementos constituintes não normalizados, determinando as dimensões a inscrever nos desenhos em esboço, através da medição direta das peças reais, por meio dos instrumentos de medição considerados mais adequados [A3]. Sempre que necessário, de acordo com os conceitos desenvolvidos na secção 2.9 deste trabalho, os valores medidos deverão ser arredondados para valores das séries de números normais.

Concluídos os diferentes esboços, verifica-se, mentalmente, a possibilidade de montagem dos vários elementos componentes. Estabelece-se o número de projeções indispensável para a definição do conjunto e passa-se à execução do esboço da montagem. Este traçado deve iniciar-se pela vista principal, a partir da traçagem dos eixos e dos contornos principais das peças de maiores dimensões, passando-se seguidamente aos contornos das peças mais pequenas. O tracejamento das superfícies cortadas só deve ser executado quando o traçado geométrico está concluído. A elaboração da respetiva lista de peças permite o esclarecimento complementar de todos os elementos constituintes.

O desenho de conjunto final, elaborado por esta via, complementado pelos esboços cotados dos seus elementos constituintes não normalizados, pode também ser utilizado como uma via para a elaboração dos desenhos de definição de produto acabado (desenhos de detalhe) finais desses elementos componentes.

Em DCM, o aperfeiçoamento das capacidades de visualização espacial e de comunicação técnica pode ser realizado através da leitura de desenhos de conjunto de sistemas mecânicos, em representação ortográfica, com a elaboração das correspondentes vistas explodidas (representações perspéticas de conjuntos, nas quais todos os componentes estão desenhados à mesma escala e corretamente orientados entre si, mas separados uns dos outros, na sequência correta de montagem, ao longo de eixos comuns, habitualmente executados em axonometria isométrica ampliada), em folhas de papel A3 dispostas sobre grelhas de reticulado isométrico, ver exemplo na figura 3.35.

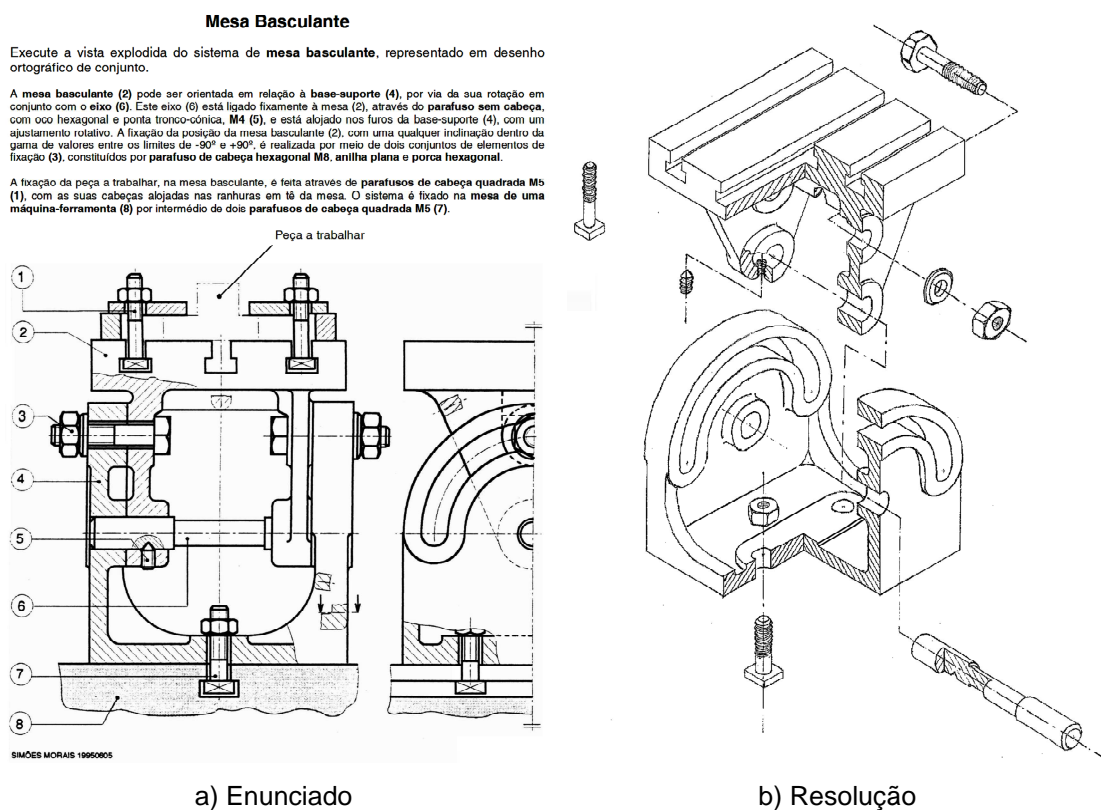
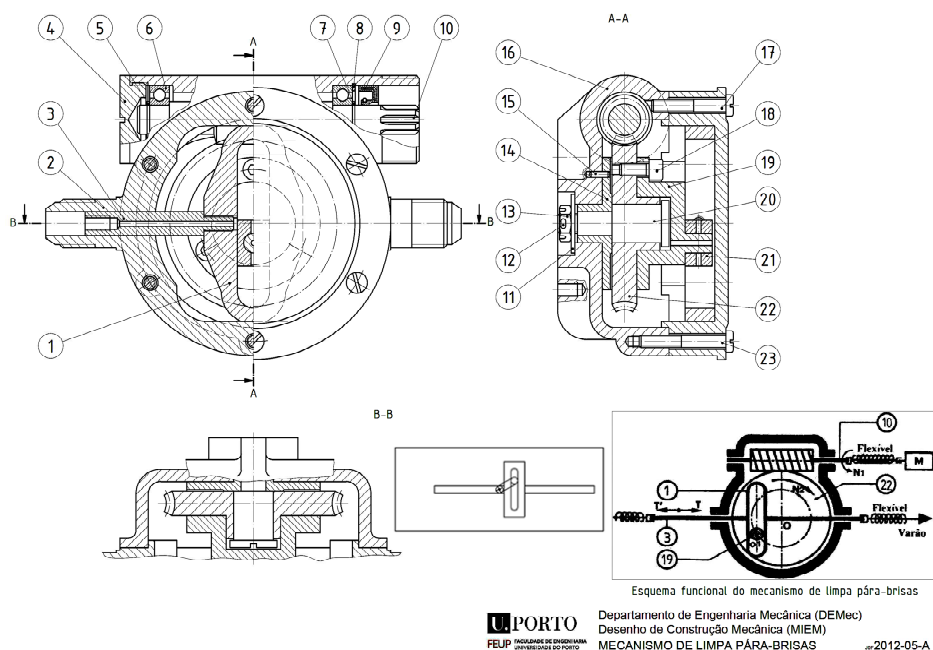


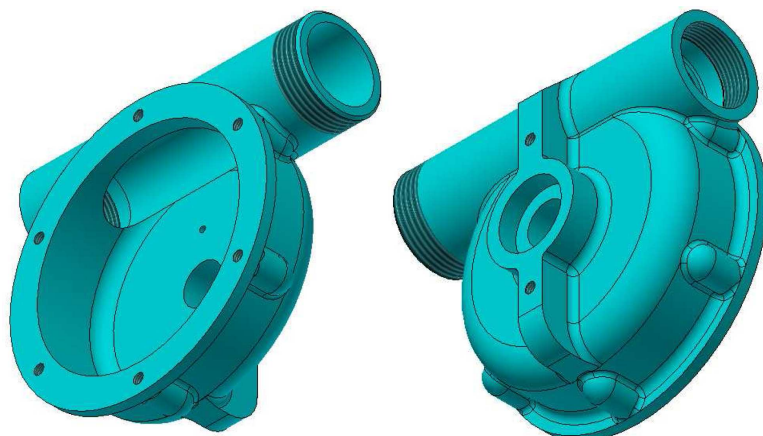
Figura 3.35 – Exemplo de vista explodida de um sistema de mesa basculante elaborada a partir da leitura do seu desenho de conjunto em representação ortográfica

Este tipo de exercícios prepara os estudantes para a leitura de desenhos de conjunto de sistemas mecânicos, em representação ortográfica, com vista à sua introdução na elaboração dos desenhos de definição de produto acabado dos diversos elementos componentes não normalizados.

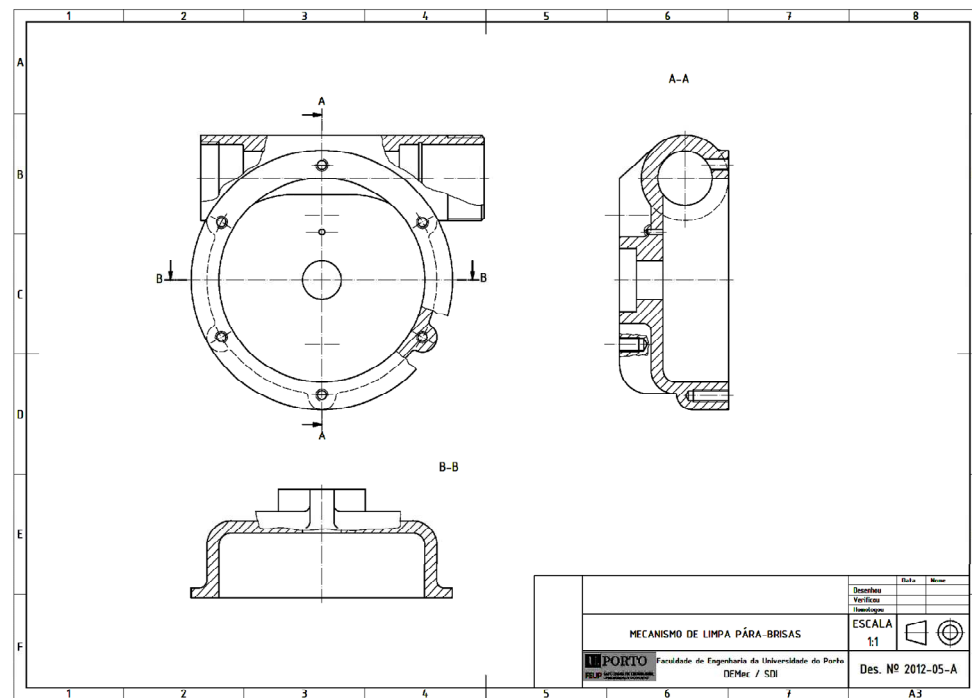
A introdução à análise funcional de mecanismos, com a execução de desenhos de definição de produto acabado (desenhos de detalhe) de alguns dos seus principais componentes, é realizada com base em desenhos de conjunto de sistemas mecânicos, em representação ortográfica, à escala 1:1 [ver exemplo na figura 3.36 a)], acompanhados pelos correspondentes enunciados textuais, fornecidos em folhas A4. Nestes textos, faz-se uma descrição complementar do funcionamento dos respetivos sistemas, solicitando-se a elaboração do desenho de definição de uma das peças componentes mais relevantes que deverá ter em conta um conjunto de considerações, necessariamente incompleto do ponto de vista dos contextos reais, mas que permite introduzir os estudantes na linguagem da “Especificação geométrica de produtos” (GPS).



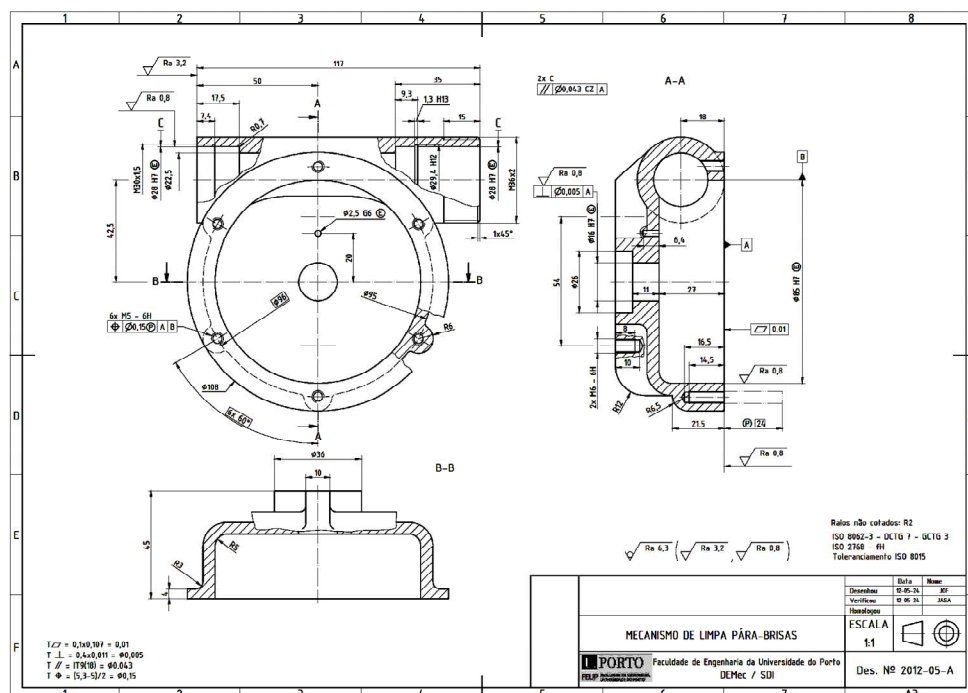
a) Enunciado fornecido em folha de formato A3



b) Simulação da visualização espacial da peça em análise, materializada em CAD 3D



c) 1ª parte da resolução: desenho da peça em representação ortográfica nominal



d) 2ª parte da resolução: desenho de definição da peça

Figura 3.36 – Exemplo do desenho de definição de produto acabado do corpo de um mecanismo de limpa pára-brisas, elaborado em representação ortográfica

Na resolução de um exercício deste tipo, os estudantes deverão começar por tentar compreender o funcionamento do sistema mecânico em questão e visualizar a configuração espacial da peça em análise, conforme se exemplifica, na figura 3.36 b), através de uma simulação dessa visualização espacial, materializada através de uma representação obtida em CAD 3D.

Em seguida, deverão elaborar uma representação ortográfica nominal da peça em apreço, numa folha de formato A3, através de uma escolha criteriosa das vistas e cortes considerados necessários, ver exemplo na figura 3.36 c). Finalmente, tendo em conta a função da peça e a sua conjugação com as restantes peças do conjunto, os estudantes deverão estar em condições de estabelecer uma cotação nominal adequada para a peça, inscrevendo também todos os tipos de toleranciamentos solicitados no respetivo enunciado, ver exemplo na figura 3.36 d). Neste âmbito, merece ser destacado que a SDI, através do Prof. Simões Morais, foi pioneira na introdução do toleranciamento geométrico moderno, ao nível do ensino universitário em Portugal.

Nas antigas e nas atuais instalações da FEUP, as aulas práticas das disciplinas de “Desenho” decorreram sempre em duas salas equipadas com estiradores escolares. Os trabalhos práticos de DCM, relativos a desenhos de conjunto de sistemas mecânicos e a desenhos de definição de peças componentes, realizados com traçado rigoroso, em folhas de formato A3, eram executados com o auxílio de pranchetas e tês, até 1987, ano a partir do qual passaram a ser executados com o auxílio de máquinas de desenhar de sistema ortogonal, até 2000, ano da mudança para as atuais instalações da FEUP, na Asprela [S2]. Como entretanto, os sistemas de CAD já estavam disseminados pela generalidade do tecido industrial nacional, a execução de desenhos em traçado manual rigoroso foi perdendo importância e, a nível universitário, o ensino da representação gráfica passou a promover um traçado manual mais livre, no apoio ao desenvolvimento das capacidades de visualização espacial e de comunicação técnica que continuam a ser essenciais para a elaboração das “especificação técnicas”, no âmbito do “Processo de desenvolvimento de produtos”.

A partir do ano letivo 1980/81, a Direção da LEM alterou o regime de funcionamento das disciplinas de “Desenho e Métodos Gráficos” (DMG) e de “Desenho de Construção Mecânica” (DCM), de semestral para anual, com o objetivo de diminuir o período de tempo de interrupção de aulas, na transição entre semestres, uma vez que tal mudança permitia reduzir o número total de provas de avaliação (exames e recursos).

Por outro lado, na segunda metade da década de 80 do século passado, a grande participação de profissionais de setores diferenciados da atividade económica (engenheiros, projetistas e desenhadores), registada nos vários cursos de especialização em “Desenho de Construção Mecânica”, ministrados por docentes da SDI e organizados pelo INEGI, no âmbito do Programa de formação do CENFIM, nas instalações do LNETI (Del. Reg. do Norte), no Porto, veio a ter um impacto significativo ao nível dos trabalhos de definição estratégica então em curso no DEMec. Nessas ações de formação, para além de se promover uma atualização e aprofundamento dos conhecimentos da normalização ISO, no domínio da atual “Especificação técnica de produtos”, os formandos eram iniciados nas então novas **tecnologias de CAD e CAM**, tarefas nas quais o Eng. Joaquim Fonseca, da SDI, e o Prof. Carlos Reis Gomes, da SMAP – Secção de Mecânica Aplicada, tiveram um papel destacado [S2]. Até então, no DEMec, o ensino e a utilização do CAD dispunham de meios gráficos



limitados e estavam praticamente confinados ao ensino pós-graduado e à I&D, enquanto, em termos de CAM, não existia qualquer tipo de equipamento no DEMec/INEGI [T1].

Assim, em 1988, na sequência da elaboração do plano de reapetrechamento do DEMec/INEGI em equipamento informático e de fabricação assistida por computador, com vista a permitir viabilizar a implementação de um novo plano de estudos na LEM [T1], foi montada, nas instalações do edifício Parcauto, na Rua dos Bragas, uma sala de aulas com 15 PCs equipados com *software* de CAD-2D (AutoCAD, etc.) e feita a aquisição de um torno mecânico e de uma fresadora de CNC (*“Computer numeric control”*). Este facto, associado à experiência entretanto adquirida no ensino das técnicas de CAD e CAM, nos primeiros “Cursos de especialização em DCM”, realizados nas instalações e com equipamento do LNETI, permitiu a criação e estruturação, na LEM, de uma nova disciplina de **“Conceção e Fabrico Assistidos por Computador”** (CFAC), em 1989/90, com os seguintes objetivos específicos principais [A4]:

- Desenvolvimento das capacidades para manusear informação geométrica e não geométrica, na área da produção.
- Promoção de uma correta e eficaz utilização de programas comerciais de CAD, com o desenvolvimento de programas computacionais que permitam tratar a informação obtida a partir daqueles utilitários.
- Iniciação à programação de máquinas de CNC, com utilização de programas de CAD/CAM.

Esta disciplina foi posicionada no 3º ano do Curso, de modo que os estudantes possuissem os conhecimentos de base sobre “representação gráfica” e “tecnologias mecânicas” que lhes permitissem tirar o máximo proveito da sua frequência, e os seus principais objetivos práticos iniciais incidiam sobretudo na utilização adequada de programas comerciais de CAD 2D (ver exemplos de aplicação, na figura 3.37) e no desenvolvimento de programas de comando numérico para operações de trabalho de corte por arranque de apara em tornos mecânicos e fresadoras [R3]. Com a introdução de CFAC no novo plano de estudos da LEM, a disciplina de “DCM” passou a ser apenas semestral.

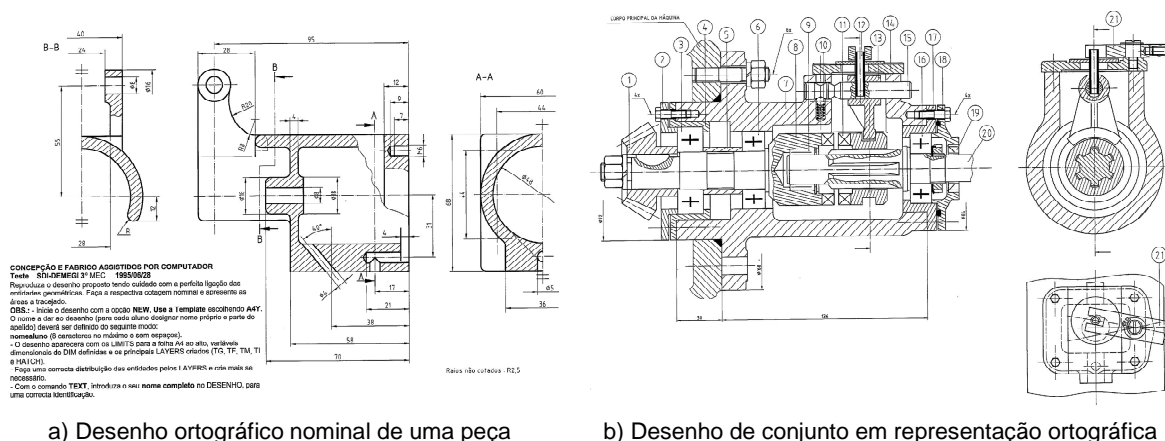


Figura 3.37 – Exemplos de exercícios de reprodução de desenhos em representação ortográfica, realizados pelos estudantes, em sistemas de CAD 2D [A4]

A partir do ano letivo 1998/99, a FEUP começou a dispor de meios que permitiram a promoção de uma utilização crescente de programas comerciais de CAD 3D (SolidWorks, Inventor, etc.), ao nível da disciplina de CFAC, que se generalizou a partir da mudança para as atuais instalações, na Asprela, em 2000/01, e que passou a dar origem à realização anual de dezenas de trabalhos práticos, neste domínio, alguns dos quais estão representados, a título de exemplo, na figura 3.38.

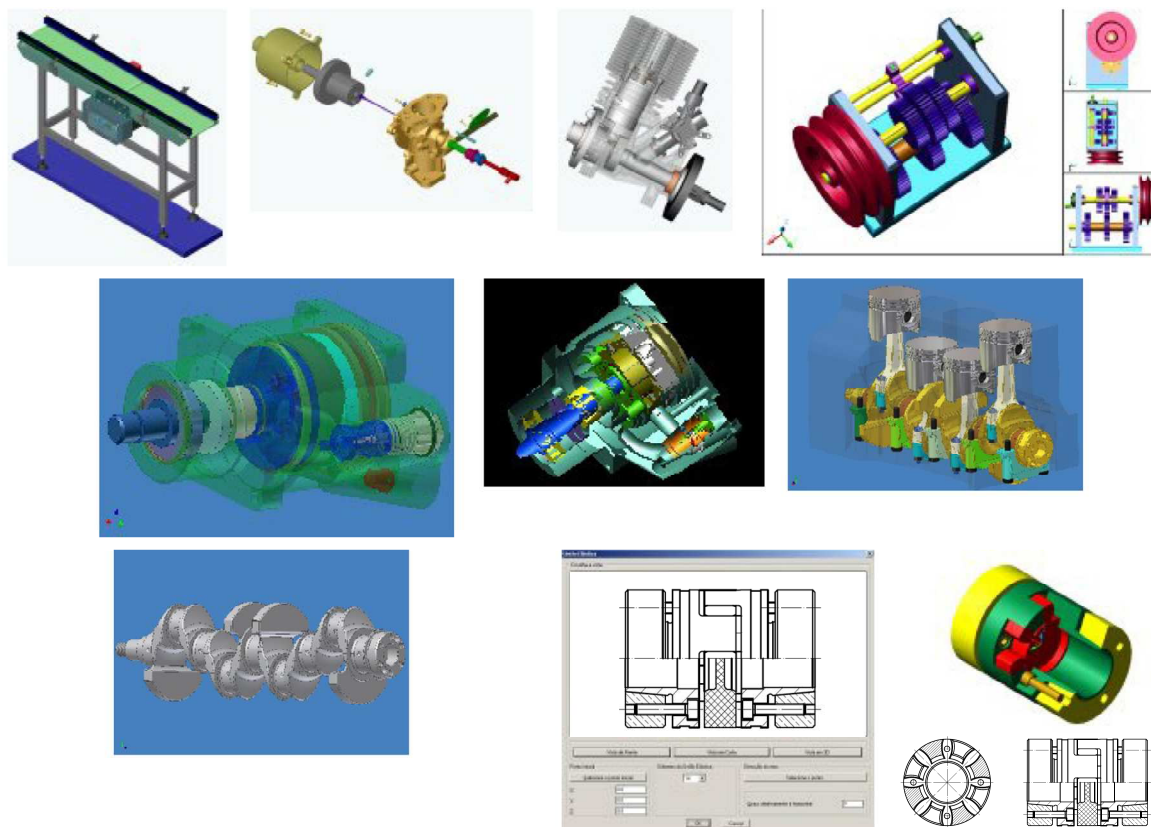


Figura 3.38 – Alguns exemplos de trabalhos práticos realizados em sistemas de CAD 3D, por estudantes de CFAC, no ano letivo 2002/03 [A4]

Em 1988/89, com a entrada em funcionamento do já referido plano de estudos da LEM, a disciplina anual de “Desenho e Métodos Gráficos” passou a ser designada de “Desenho Técnico” e, mais tarde, a partir de 1994/95, foi subdividida nas disciplinas semestrais de “Geometria Descritiva” e de “Desenho Técnico”. Esta nova preferência por disciplinas em regime semestral foi justificada pelo facto de, deste modo, passar a ser mais fácil acomodar quaisquer futuras alterações do plano de estudos.

Em 1997/98, com a entrada em vigor de um novo plano de estudos da LEM, a disciplina de “Geometria Descritiva” foi retirada definitivamente e, na disciplina de “Desenho Técnico”, foi criado um módulo de **“Introdução aos Sistemas e Componentes Mecânicos de Utilização Corrente”**, com aulas práticas laboratoriais de 2 h/semana, tendo por objetivo a promoção e o desenvolvimento da curiosidade e do espírito crítico dos estudantes, sobre o modo de funcionamento e a constituição de alguns sistemas mecânicos (reductores, máquinas hidrostáticas, cilindros pneumáticos, etc.). Ao efetuarem a desmontagem e montagem deste tipo de sistemas, apoiados na leitura dos correspondentes desenhos de conjunto, a maioria dos estudantes começam a ter um primeiro



contacto direto com uma boa parte dos elementos e órgãos mecânicos mais correntes (ver exemplo na figura 3.39). Complementarmente, passou também a fazer-se uma **Introdução à metrologia dimensional** com a realização de alguns pequenos trabalhos práticos, o que contribuiu para estreitar a relação entre as especificações dimensionais e a sua verificação em peças mecânicas, por intermédio de instrumentos de medição convencionais. Posteriormente, com a entrada em vigor do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM), em 2006/07, em substituição da LEM, este módulo continuou a ser ministrado pela SDI, até 2012/13. Com a entrada em funcionamento, em 2013/14, do atual plano de estudos do MIEM, estas aulas passaram a estar enquadradas na unidade curricular de “Introdução à Engenharia Mecânica”, da responsabilidade da Secção de Materiais e Processos Tecnológicos (SMPT). A introdução deste tipo de aulas foi muito bem recebida, com manifesto proveito pedagógico, pelos estudantes, tendo merecido referências muito positivas por parte dos avaliadores do Curso, quer da Fundação das Universidades Portuguesas (FUP), quer da Ordem dos Engenheiros [A4, S2], nomeadamente no processo de avaliação de qualidade para a atribuição do selo EUR-ACE ao MIEM, em 2008.

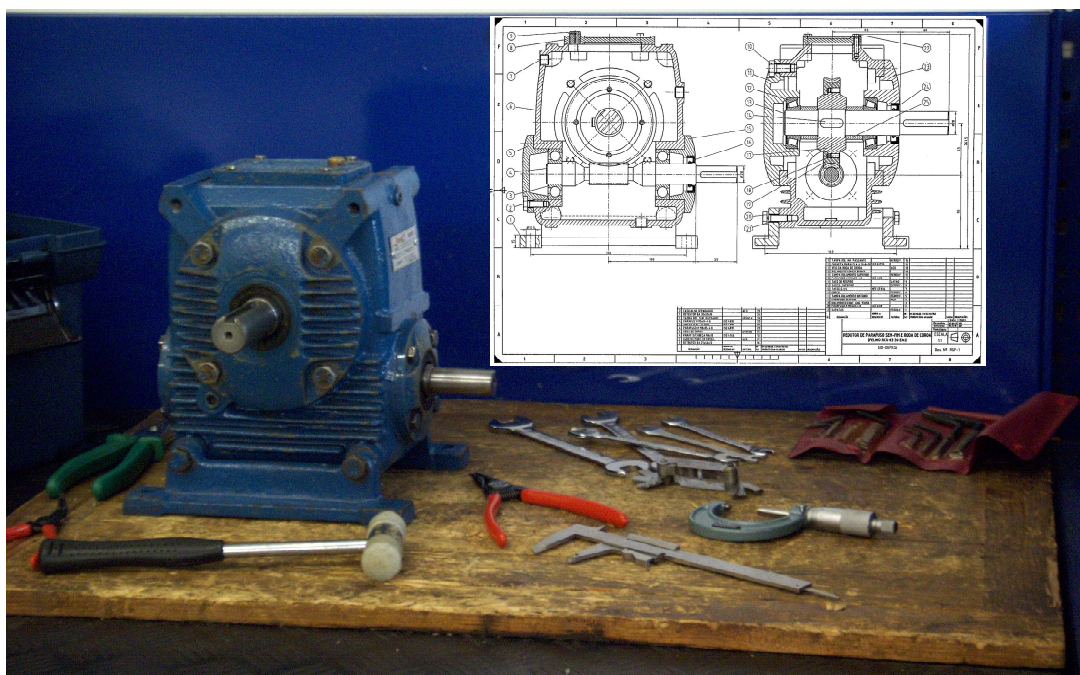


Figura 3.39 – Exemplo de um “reductor de parafuso sem-fim/roda de coroa” utilizado nas aulas de desmontagem e montagem de sistemas mecânicos realizadas com o apoio dos correspondentes desenhos de conjunto em representação ortográfica

Após esta breve descrição da evolução do ensino na área do “Desenho e CFAC”, registada nos cursos de Engenharia Mecânica da FEUP, nos últimos quarenta anos, justificam-se alguns comentários que ajudem a enquadrar melhor as opções tomadas ao nível dos conteúdos programáticos lecionados e das estratégias pedagógicas seguidas, de modo que o DEMec, neste mesmo período, mantivesse uma capacidade de resposta adequada aos desafios colocados pela importância crescente que a “Representação gráfica” e a “Especificação geométrica” (GPS) vêm

assumindo na linguagem de especificação técnica, no âmbito do “Processo de desenvolvimento de produtos”.

A “**Especificação técnica de produtos**” (TPS) é um domínio fundamental de conhecimento, num curso de Engenharia Mecânica, sendo importante para todos os profissionais com atividades ligadas à conceção, à construção ou à reparação de peças ou sistemas mecânicos. Os princípios de representação e definição de peças estão na base de uma linguagem de comunicação gráfica, mas contribuem também fortemente para estimular o desenvolvimento de um pensamento de carácter visual e espacial, lógico e claro [B4], que é uma das capacidades mais apreciadas em projetistas de máquinas, de ferramentas ou de peças técnicas.

A Licenciatura em Engenharia Mecânica (LEM), antes de 1974, tinha um plano de estudos de 5 anos, era constituída por 53 disciplinas semestrais que representavam um total de 305 h/semana de contacto professor/estudante, o que correspondia a uma média, por semestre, de 30,5 h/semana. As disciplinas na área de “Desenho” eram 4 e representavam um total de 25 h/semana, o que dava uma média de 6,25 h/semana de contacto professor/estudante, por disciplina [S1, A6].

Por sua vez, em 2015, o Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM) mantém um plano de estudos de 5 anos, é constituído por 45 unidades curriculares (UCs) semestrais mais uma dissertação de um semestre que representam um total de 182,5 h/semana de contacto professor/estudante. As UCs de “Desenho e CFAC”, da responsabilidade da SDI, são agora apenas 3 e representam um total de 12 h/semana, o que dá uma média de 4 h/semana de contacto professor/estudante, por UC [R2].

Esta redução das horas de contacto professor/estudante, verificada no MIEM, vem na sequência da implementação do “Processo de Bolonha”, em Portugal, tendo em vista uma harmonização dos vários sistemas de ensino superior europeus, de acordo com os objetivos da “Declaração de Bolonha” (1999). Segundo a referência [P1], com este “Processo”, pretende-se fazer uma mudança do paradigma de ensino, de um modelo baseado na transmissão de conhecimentos para um modelo baseado no desenvolvimento de competências, englobando as de carácter geral e as de natureza específica associadas à área de formação, onde as componentes experimental e de projeto desempenham um papel importante. Os estudantes são um dos elementos centrais do “Processo de Bolonha”. A mudança de paradigma do ensino para a aprendizagem assenta no desenvolvimento de competências (o que é que um estudante é capaz de ou sabe fazer?) face aos objetivos da aprendizagem (o que é que um estudante deve ser capaz de fazer?). Esta centralidade do estudante, neste “Processo”, torna-o um elemento ativo no processo de aprendizagem que se pressupõe decorrer ao longo da vida.

Neste contexto, a atual estruturação do ensino do “Desenho e CFAC”, no MIEM, teve em conta dois aspetos de base:

- 1) Os conhecimentos sobre “Representação gráfica” adquiridos pelos estudantes do MIEM, no Ensino Secundário;

## 2) O perfil de competências requerido para um mestre em Engenharia Mecânica pela FEUP.

Relativamente ao primeiro aspeto, constata-se que no presente “Regime de acesso ao MIEM” não consta qualquer disciplina específica de “Representação gráfica”. Alguns inquéritos informais realizados quase todos os anos, nas aulas, permitem constatar que 30 a 40 % dos estudantes admitidos no 1º ano nunca tiveram uma disciplina de “Geometria descritiva” e 70 a 80 % dos estudantes nunca frequentaram qualquer disciplina de “Desenho técnico”, ao nível do Ensino Secundário. Deve registar-se que, apesar da situação descrita, a disciplina de “Geometria Descritiva” foi retirada definitivamente do plano de estudos da LEM, em 1997/98, aquando da revisão então efetuada.

Por outro lado, assume-se que uma das competências fundamentais a adquirir por um engenheiro mecânico, com o grau de Mestre pela FEUP, distinta das obtidas por um engenheiro-técnico mecânico formado pelos Institutos Politécnicos, é a maior e melhor formação ao nível da **engenharia de conceção**, que lhe é ministrada na FEUP.

A estratégia de ensino/aprendizagem na área do “Desenho e CFAC”, adotada no atual MIEM, tem em conta que os diferentes setores industriais nacionais precisam de engenheiros e técnicos com boas competências ao nível do **“processo de desenvolvimento de produtos”**, de modo a poderem incrementar a produção de bens transacionáveis, sobretudo os que apresentam um nível tecnológico elevado. As diferentes unidades curriculares de “Desenho e CFAC” prestam-se para **a promoção da inovação e da criatividade** (os problemas de representação mais conveniente de peças e sistemas mecânicos são “problemas abertos”, com várias soluções alternativas), para a aplicação de conhecimentos sobre tecnologias de fabrico e de materiais, metrologia, etc., funcionando, até certo ponto, como **unidades curriculares de síntese de conhecimentos** [A5, S2].

Assim, no ensino do “Desenho Técnico” e do “Desenho de Construção Mecânica”, procura-se conciliar o desenvolvimento das capacidades de visualização espacial, de expressão e representação gráfica e a sua utilização em atividades de conceção, com a aquisição de conhecimentos de natureza tecnológica neste domínio, nomeadamente, sobre normalização de sistemas e componentes mecânicos, especificações geométricas de produtos, princípios e métodos de verificação, processos gerais de fabricação, etc.

No ensino do “Desenho (Conceção) e Fabrico Assistidos por Computador”, promove-se uma aprendizagem da utilização consistente de sistemas CAD 2D e 3D, resultante da incorporação dos conceitos da documentação técnica de produtos (TPD), da normalização de sistemas e componentes mecânicos e da linguagem GPS, anteriormente adquiridos.

Nos trabalhos preparatórios de elaboração de qualquer novo plano de estudos em Engenharia Mecânica, no DEMec, colocam-se sempre algumas questões ao nível dos conteúdos programáticos

adotados e das estratégias pedagógicas seguidas, pela SDI, que podem ser resumidas, sucintamente, nas duas interrogações seguintes:

- 1) Os CAD 2D e 3D não poderiam começar a ser ensinados logo no 1º ano do MIEM, em “Desenho Técnico”, uma vez que estas tecnologias são já de utilização corrente, a nível industrial e, segundo alguns autores [B1], contribuiriam até para tornar esta unidade curricular ainda mais atrativa aos olhos dos novos estudantes?
- 2) Uma vez que, a nível industrial, os modelos de sólidos passaram a ser a fonte primária de definição da geometria nominal dos produtos, a partir da qual podem ser gerados os correspondentes desenhos de engenharia, porquê manter, em “DCM”, um grau de exigência tão elevado ao nível da representação e da leitura de desenhos de conjunto em representação ortográfica, sem o apoio dos modelos de sólidos dos correspondentes sistemas mecânicos, obtidos previamente por intermédio de sistemas de CAD 3D?

As respostas a estas questões pressupõem que se comece por afirmar que o ensino universitário e o ambiente industrial funcionam em contextos e com objetivos diferentes. Nas unidades curriculares de formação de base, o ensino universitário deve dar prioridade ao ensino/aprendizagem dos conceitos fundamentais que ajudem a promover a aquisição de conhecimentos nos domínios da matemática, da física, da representação gráfica, etc., indispensáveis ao desenvolvimento de capacidades e competências, nos estudantes, que poderão ser decisivas para a sua adaptação às futuras e inevitáveis mudanças, nomeadamente de carácter tecnológico, que irão ter de enfrentar ao longo do seu percurso profissional.

Assim, na UC de “**Desenho Técnico**”, o atual número reduzido de horas de contacto professor/estudante, associado ao baixo nível de conhecimentos prévios, manifestado pela generalidade dos discentes, neste domínio, obriga a que a atenção seja focada, sobretudo, nos princípios gerais de representação gráfica e no desenvolvimento das capacidades de visualização espacial e de comunicação técnica, assuntos considerados fundamentais para permitir uma qualquer abordagem posterior de conceitos mais elaborados. No entanto, no “espírito do Processo de Bolonha”, nada impede que, em termos extra-curriculares, os estudantes façam uma iniciação individual aos sistemas de CAD, aproveitando as facilidades concedidas, pelo Centro de Informática (CICA) da FEUP, em termos de instalação e acesso a programas comerciais, disponíveis num repositório de *software* acessível a toda a comunidade académica da FEUP, através do seguinte endereço: ([https://sigarra.up.pt/feup/pt/web\\_base.gera\\_pagina?P\\_pagina=21203](https://sigarra.up.pt/feup/pt/web_base.gera_pagina?P_pagina=21203)).

Relativamente à circunstância de, na UC de “**Desenho de Construção Mecânica**”, os trabalhos com desenhos de conjunto de sistemas mecânicos e desenhos de definição de peças componentes, em representação ortográfica, continuarem a obedecer a padrões de exigência elevados, numa época em que os modelos de sólidos, elaborados em CAD 3D, passaram já a ser as fontes primárias de definição da geometria nominal dos produtos, a nível industrial, tal deriva do facto de, atualmente e ainda durante um período de tempo mais ou menos longo, os desenhos de engenharia (2D)

continuarem a ser ferramentas de comunicação gráfica muito importantes em diferentes fases do processo industrial, pelas razões já indicadas na secção 3.2 deste texto e desenvolvidas nas referências [Q1, M3, C2].

No que respeita ao ensino/aprendizagem no domínio da utilização de **sistemas de CAD** avançados, deve ter-se em consideração que estes sistemas são ferramentas poderosas na estruturação e na comunicação de informação entre as fases de conceção, de produção e do controlo de qualidade dos produtos. No entanto, para se conseguir uma utilização profícua e eficaz deste tipo de aplicações, num período de contacto professor/estudante reduzido, o utilizador deve possuir bons conhecimentos de construções geométricas no espaço 2D e de cotação nominal, e ter adquirido a capacidade para estruturar toda a modelação e, dentro do possível, para relacionar as sucessivas operações a executar com as anteriormente realizadas, de modo a permitir que uma qualquer alteração possa ter o efeito pretendido sobre a totalidade do objecto e/ou sistema em causa [A4].

Quanto ao processo de aprendizagem ao longo da vida, também preconizado pela filosofia adstrita ao “Processo de Bolonha” [P1], os docentes da SDI têm promovido ou colaborado na realização de **“Ações de formação de curta e média duração”**, fundamentalmente no domínio da “Especificação geométrica de produtos” (GPS), dirigidas a engenheiros, projetistas e desenhadores e realizadas, periodicamente, em empresas tais como, por exemplo, a Bosch-Vulcano (Cacia), a Celoplás (Barcelos), a Sodecia (Maia), o CINFU (Porto), a Küpper & Schmidt (O. Azeméis), a Gametal (Ovar), o CENFIM (Porto) , etc.

Novos engenheiros com sólida formação nos domínios abordados são muito apreciados pela Indústria Nacional e da Região Norte em particular. Uma das competências dos graduados em Engenharia Mecânica, pela FEUP, mais valorizadas pelas entidades empregadoras e que tem permitido distingui-los positivamente face aos colegas formados por outras Escolas é o seu bom desempenho na interpretação e execução de desenhos de engenharia, mesmo em atividades de grande exigência neste domínio, como é o caso da indústria dos moldes. Neste contexto, as atuais unidades curriculares de “Desenho e CFAC” podem ser vistas como uma característica de diferenciação positiva do MIEM, em relação a muitos dos outros cursos de Engenharia Mecânica nacionais, no atual quadro de desenvolvimento económico do País.

### 3.6 Considerações finais

No atual mercado global, os engenheiros e os técnicos em geral devem possuir conhecimentos de representação gráfica cada vez mais sólidos, de modo a fazerem face ao uso crescente de meios de comunicação gráfica, que tornam mais fácil a circulação da informação técnica. O Desenho técnico é uma linguagem gráfica normalizada, a nível mundial, que permite estabelecer a comunicação técnica entre todos os ramos da Engenharia. Neste contexto, a **Documentação técnica de produtos**, que

engloba os diversos tipos de desenhos técnicos, é o único meio oficial de comunicação e serve de base para a interpretação dos contratos.

Com a utilização generalizada dos sistemas de CAD 3D, os **modelos virtuais de sólidos** tornaram-se responsáveis pela definição da geometria nominal dos produtos, que passou a ser uma função secundária (e redundante) dos desenhos de engenharia. No entanto, os **desenhos 2D** gerados a partir de modelos 3D são, atualmente, e continuarão a ser, num futuro previsível, muito utilizados, a nível industrial, atendendo aos limites da integração das fases de conceção, fabricação e verificação registados em muitas empresas [C2].

Deve também ser assinalado que, apesar do contexto tecnológico descrito neste trabalho, a aptidão para fazer desenhos à mão livre, em folhas de papel, é uma competência muito importante em termos da representação gráfica em engenharia, pois permite desenvolver as capacidades de visualização espacial e de comunicação técnica – imaginar soluções construtivas, traduzindo-as em desenhos ilustrativos ou explicando-as a outros.

Finalmente, merece ser destacado o papel desempenhado pela Secção de Desenho Industrial do DEMec, ao longo dos últimos quarenta anos, na introdução e desenvolvimento dos novos conceitos, no âmbito da “Especificação técnica de produtos”, ao nível do Ensino universitário nacional e na sua promoção e divulgação a nível industrial.

## 3.7 Referências

- [A1] – ALMACINHA, J. A. – *O Sistema Normativo para Uma Especificação Técnica de Produtos Adequada ao Mercado Global no Domínio da Construção Mecânica* [Em linha]. Rev. Tecnometal. Porto: AIMMAP. 2005, 159, p. 5-13. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://sigarra.up.pt/feup/pt/publs\\_pesquisa.FormView?P\\_ID=13397](http://sigarra.up.pt/feup/pt/publs_pesquisa.FormView?P_ID=13397)>.
- [A2] – ALMACINHA, J. A.; SIMÕES MORAIS, J. M. – *Desenho Técnico*. Texto de apoio às aulas teóricas e coleção de exercícios a executar nas aulas práticas da unidade curricular de Desenho Técnico. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FEUP. Porto: AEFEUP Editorial. 8ª ed. 2013.
- [A3] – ALMACINHA, J. A.; SIMÕES MORAIS, J. M. – *Desenho de Construção Mecânica*. Texto de apoio às aulas teóricas e coleção de exercícios a executar nas aulas práticas da unidade curricular de Desenho de Construção Mecânica, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FEUP. Porto: AEFEUP Editorial. 8ª ed. 2014.
- [A4] – ALMACINHA, J. A.; TAVARES, J. M. R. S.; FONSECA J. O. – *O Ensino do Desenho na Licenciatura em Engenharia Mecânica* [Em linha]. Documento da Secção de Desenho Industrial. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, 2003. 68 p. [Consult. 22 out. 2013]. Disponível em WWW:<URL:[https://sigarra.up.pt/feup/pt/publs\\_pesquisa.FormView?P\\_ID=26979](https://sigarra.up.pt/feup/pt/publs_pesquisa.FormView?P_ID=26979)>.
- [A5] – ALMACINHA, J. A. – *Alguns comentários acerca da proposta de Reformulação do Plano de Estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM)*. Documento interno do DEMec. Porto: FEUP, 2010-05-30. 4 p.
- [A6] – *Anuário da Faculdade de Engenharia*. Vol. I. Porto: FEUP. 1973. 172 p.



- [B1] – BARR, R. E.; JURICIC, D. – *From Drafting to Modern Design Representation: The Evolution of Engineering Design Graphics* [Em linha]. Journal of Engineering Education. July 1994, p. 263-270. [Consult. 8 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.jee.org/1994/july/124.pdf>>.
- [B2] – BARR, R. E. – *The Current Status of Graphical Communication in Engineering Education* [Em linha]. 34th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference. October 20-23, 2004, Savannah, GA. p. SID8-13. [Consult. 8 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://fie2012.org/sites/fie2012.org/history/fie2004/papers/1107.pdf>>.
- [B3] – BENNICH, P.; NIELSEN, H. – *An overview of Geometrical Product Specifications* [Em linha]. IfGPS. 2005, 12 p. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.ifgps.com/An%20Overview%20of%20GPS.pdf>>.
- [B4] – BERTOLINE, G. R. – *Graphics Literacy in a Modern Engineering/Engineering Technology Curriculum* [Em linha]. Proceedings Frontiers in Education 21st Annual Conference, 1991. L. P. Grayson, Ed. (pp. 556 - 559). West Lafayette, Indiana. [Consult. 3 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=187548>>.
- [B5] – BOOKER, P. J. – *A History of Engineering Drawing*. London: Chatto & Windus, Ltd., 1963.
- [B6] – *Business Plan of ISO/TC 10 – Technical product documentation* [Em linha]. Versão 3. ISO, 2007-04-25, 19 p. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO\\_TC\\_010\\_Technical\\_product\\_documentation\\_.pdf?nodeid=984765&vernum=-2](http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO_TC_010_Technical_product_documentation_.pdf?nodeid=984765&vernum=-2)>.
- [B7] – *Business Plan of ISO/TC 213 – Dimensional and geometrical product specifications and verification* [Em linha]. Versão 5 Draft 1. ISO, 2008-01-09, 14 p. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO\\_TC\\_213\\_Dimensional\\_and\\_geometrical\\_product\\_specifications\\_and\\_verification\\_.pdf?nodeid=999295&vernum=-2](http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO_TC_213_Dimensional_and_geometrical_product_specifications_and_verification_.pdf?nodeid=999295&vernum=-2)>.
- [C1] – CHEVALIER, A. – *Guide du dessinateur industriel*. Paris: Hachette Technique, 1998.
- [C2] – CONCHERI, G. – *Le nuove norme impongono un cambio radicale dell'insegnamento del disegno* [Em linha]. Giornata Naz. ADM – La rivoluzione dell'insegnamento del disegno: le nuove normative ISO e ASME. Torino, 28 maggio 2014. [Consult. 2 jul. 2014]. Disponível em WWW:<[http://adm.ing.unibo.it/Files/Concheri\\_Giornata\\_Naz\\_ADM\\_28mag14.pdf](http://adm.ing.unibo.it/Files/Concheri_Giornata_Naz_ADM_28mag14.pdf)>.
- [C3] – CUNHA, V. – *Desenho Técnico*. 14ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2008.
- [G1] – GONÇALVES, L. – *Geometria Descritiva 1 – Projecções axonométricas, desenho cotado, projecção cotada, projecção cónica, dupla projecção*. 1ª ed. Lisboa: Emp. Lit. Fluminense Lda, 1979.
- [G2] – GRIFFITHS, B. – *Engineering Drawing for Manufacture*. U.K.: Kogan Page Science, 2003.
- [H1] – HARRIS, L. V. A.; MEYERS, F. – *Engineering Design Graphics: Into the 21st Century* [Em linha]. Engineering Design Graphics Journal. 2007, Vol 71, No 3, p. 20-34. [Consult. 3 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.edgj.org/index.php/EDGJ/article/viewFile/7/6>>.
- [I1] – ION B.; SMITH D. – *The Conceptual Design Phase – Conceptual Design Curriculum: The Conceptual Design Process* [Em linha]. In Information for Engineering Design Teachers. Curriculum guides. The Curriculum Reports. SEED (Sharing Education in Engineering Design organisation) open educational resources for Engineering Design. University of Bath. [Consult. 14 Out. 2013]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.bath.ac.uk/idmrc/themes/projects/delores/co-design-website/>>.

- [M1] – MARTINS, A. F. P. – *Da maquete para o desenho: meios de representação tridimensional no design de artefactos* [Em linha]. Dissertação de Mestrado em Design, Materiais e Gestão do Produto. Aveiro: U. de Aveiro, 2010. [Consult. 8 Out. 2013]. Disponível em WWW:<URL:<http://ria.ua.pt/bitstream/10773/1228/1/2010000696.pdf>>.
- [M2] – MATEUS, L. M. C. – *Sistema Axonométrico de Representação – História, Teoria e Prática* [Em linha]. Trabalho de síntese, no âmbito de Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Lisboa: FAUTL, 2004. [Consult. 8 Out. 2013]. Disponível em WWW:<URL:[http://home.fa.utl.pt/~lmmateus/publicacoes/PAPCC\\_axonometria.pdf](http://home.fa.utl.pt/~lmmateus/publicacoes/PAPCC_axonometria.pdf)>.
- [M3] – MELTON, D. W.; STEWARDSON, G. – *The American Drafter: Why use 1<sup>st</sup> Angle Projection in a 3<sup>rd</sup> Angle World?* [Em linha]. Technology Interface Journal/Fall 2008, Vol 9, No 1. [Consult. 23 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://technologyinterface.nmsu.edu/Fall08/10\\_Melto/index.pdf](http://technologyinterface.nmsu.edu/Fall08/10_Melto/index.pdf)>.
- [N1] – NETO, R.L.; LINO, F.J.; BARATA DA ROCHA, A., F – *Utilização da Prototipagem Rápida no apoio ao Desenvolvimento de Produtos Forjados e Fundidos* [Em linha]. XXVI Senafor, IX Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Hotel Centro de Convenções SESC, Porto Alegre/RS, Brasil, 18 e 19 de Outubro de 2006. [Consult. 10 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://paginas.fe.up.pt/~falves/Brasilsenafor06.pdf>>.
- [P1] – *Processo de Bolonha – Questões Frequentes* [Em linha]. SIGARRA U.Porto. Ensino. Universidade do Porto. [Consult. 22 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[https://sigarra.up.pt/up/pt/web\\_base.gera\\_pagina?p\\_pagina=122250](https://sigarra.up.pt/up/pt/web_base.gera_pagina?p_pagina=122250)>.
- [Q1] – QUINTANA, V.; RIVEST, L.; PELLERIN, R.; VENNE, F.; KHEDDOUCI, F. – *Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry* [Em linha]. Computers in Industry. 2010, Vol 61, No 5, p. 497-508. [Consult. 10 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361510000060>>.
- [R1] – RICCA GONÇALVES, G. – *Geometria Descritiva*. 4ª ed. Lisboa: F. C. Gulbenkian, 2009.
- [R2] – *Reformulação do Plano de Estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica*. Versão 7. Documento após reunião do Conselho de Departamento do DEMec. Porto: FEUP. 2012-09-25. 25 p.
- [R3] – REIS GOMES, C.; FONSECA, J. O. – *Concepção e Fabrico Assistidos por Computador*. Texto de apoio à disciplina de Concepção e Fabrico Assistidos por Computador (3º ano). Licenciatura em Engenharia Mecânica da FEUP. Porto: AEFEUP Editorial. 1993/94.
- [S1] – SÁ, VASCO – *História do Departamento de Engenharia Mecânica – Anos 70 a 74 (Segundo capítulo)*. Documento preliminar interno do DEMec, produzido no âmbito de um trabalho de elaboração de uma “História do Departamento de Engenharia Mecânica”. Porto: FEUP, 2010. 7 p.
- [S2] – SÁ, VASCO; ALMACINHA, J. A. – *Criação e Desenvolvimento das Secções de Matemática e de Desenho Industrial*. Documento preliminar interno do DEMec, produzido no âmbito de um trabalho de elaboração de uma “História do Departamento de Engenharia Mecânica”. Porto: FEUP, 2010. 8 p.
- [S3] – SILVA, A.; RIBEIRO, C. T.; DIAS, J.; SOUSA, L. – *Desenho Técnico Moderno*. 4ª ed. Lisboa: Lidel – edições técnicas, Lda, 2004.
- [S4] – SIMÕES MORAIS, J. M. – *Geometria Descritiva*. Texto de apoio às aulas da disciplina de Geometria Descritiva (1º ano). Licenciatura em Engenharia Mecânica da FEUP. Porto: AEFEUP Editorial. 1995-96 (policopiado). 176 p.
- [S5] – SIMÕES MORAIS, J. M. – *Desenho Básico*. Desenho de Construções – 1. 26ª ed. Porto: Porto Editora, 1999.



- [S6] – SIMÕES MORAIS, J. M. – *Desenho Técnico Básico-3*. 24ª ed. Porto: Porto Editora Lda, 2007.
- [S7] – SOUZA, N. L. – *Definição de Critérios para Identificação do Perfil Tecnológico de Empresas para Implementação do Modelo Virtual do Produto* [Em linha]. Santa Bárbara d'Oeste: Universidade Metodista de Piracicaba. 2001. 112 p. Dissertação de Mestrado. [Consult. 2 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.unimep.br/phpg/bibdig/pdfs/2006/GXHGNWNIXX NS.pdf>>.
- [T1] – TAVARES de CASTRO, P.; GUIMARÃES, R. – *Plano de Reapetrechamento do DEMec/INEGI em Equipamento informático e de Fabricação Assistida por Computador*. Documento interno do DEMec/INEGI. Porto: FEUP, 1988. 83 p.

### 3.7.1 Normalização

- |                     |   |
|---------------------|---|
| ASME Y14.3:2012     | – Multiview And Sectional View Drawings. ASME.  |
| ASME Y14.24:2012    | – Types and Applications of Engineering Drawings. ASME  |
| ASME Y14.41:2012    | – Digital Product Definition Data Practices. ASME   |
| BS 8888:2013        | – Technical product documentation and specification. BSI.   |
| ISO 3:1973          | – Preferred numbers – Series of preferred numbers. ISO.   |
| ISO 17:1973         | – Guide to the use of preferred numbers and of series of preferred numbers. ISO.  |
| ISO 128 (all parts) | – Technical drawings – General principles of presentation. ISO [NP ISO 128 (todas as partes) IDT].                                |
| ISO 216: 2007       | – Writing paper and certain classes of printed matter – Trimmed sizes – A and B series, and indication of machine direction. ISO. |
| ISO 497:1973        | – Guide to the choice of series of preferred numbers and of series containing more rounded values of preferred numbers. ISO.      |
| ISO 5456-2:1996     | – Technical drawings – Projection methods – Orthographic representations. ISO (NP EN ISO 5456-2:2002 IDT).                        |
| ISO 5456-3:1996     | – Technical drawings – Projection methods – Axonometric representations. ISO (NP EN ISO 5456-3:2002 IDT).                         |
| ISO 5456-4:1996     | – Technical drawings – Projection methods – Central projection. ISO (NP EN ISO 5456-4:2002 IDT).                                  |
| ISO 11442:2006      | – Technical product documentation – Document management. ISO (NP EN ISO 11442:2013 IDT).  |
| ISO 14638:2015      | – Geometrical product specifications (GPS) – Matrix model. ISO.   |
| ISO/TR 14638:1995   | – Geometrical product specification (GPS) – Masterplan. ISO.  |
| ISO 16792:2006      | – Technical product documentation – Digital product definition data practices. ISO.   |
| ISO 17599:2015      | – Technical product documentation (TPD) – General requirements of digital mock-up for mechanical products. ISO.                   |
| ISO/TR 23605:2009   | – Technical product specification (TPS) – Application guidance – International model for national implementation. ISO.            |
| ISO 29845:2011      | – Technical product documentation – Document types. ISO (NP ISO 29845:2012 IDT).  |



# **CAPÍTULO 4**

**As bases da nova linguagem ISO  
de especificação geométrica de produtos**



## Capítulo 4

# As bases da nova linguagem ISO de especificação geométrica de produtos

### 4.1 Introdução

A partir da segunda metade do século XX, à medida que a utilização da **cotagem e toleranciamento** se foi difundindo pela indústria, surgiu a necessidade de se proceder à normalização da **sintaxe** (simbologia e regras de escrita) e da **semântica** (significado dos princípios, requisitos e tolerâncias) da sua linguagem, a um nível internacional, a partir de uma codificação das melhores práticas industriais então disponíveis.

No entanto, com a crescente utilização de sistemas computadorizados nos diferentes processos industriais, passou a dar-se uma importância cada vez maior à possibilidade de intercâmbio da informação técnica produzida, tendo surgido a necessidade de substituir a linguagem de especificação geométrica baseada na prática por uma linguagem alicerçada em princípios matemáticos que pudesse, também, ser alargada aos domínios da fabricação e da verificação, com vista a conseguir-se reduções dos tempos despendidos na realização das diferentes tarefas, contribuindo desse modo para um aumento da produtividade [A1].

Neste contexto, a codificação associada às especificações macro e micro geométricas das peças deve ser inequívoca para toda a gente e completa face à necessidade de limitar a variação geométrica funcional das peças, e a nova linguagem deverá ser aplicável aos sistemas **CAX** (isto é, CAD, CAE, CAM, etc.).

Estas circunstâncias levaram à criação do Comité técnico **ISO/TC 213** – “Especificações e verificação dimensionais e geométricas de produtos”, em 16 de junho de 1996, por junção dos Comités ISO/TC 3 – “*Limits and fits*”, ISO/TC 10/SC 5 – “*Dimensioning and tolerancing*” e ISO/TC 57 – “*Metrology and properties of surfaces*”, que começou por estabelecer a base para uma nova estrutura das normas ISO no **domínio GPS** (ver secção 4.2) e tem vindo a desenvolver um conjunto de princípios de base aplicáveis a todas as normas ISO, neste domínio [B3].

A consideração das superfícies das peças constituídas por **elementos geométricos** e a classificação destes baseada no conceito matemático de “**grupo de simetria**” desempenham um papel central na nova linguagem de Especificação geométrica de produtos (GPS) em desenvolvimento.

A **nova linguagem ISO** permite estabelecer uma classificação dos elementos geométricos e definir referências especificadas utilizadas para situar (orientar e/ou posicionar) os diferentes elementos, fornecendo também uma base racional para a parametrização destes. Os conceitos e as ferramentas para esta nova abordagem estão descritos nas normas ISO 17450-1 e -2. Estas ferramentas são baseadas nas **características dos elementos** (ver secção 4.4), nas **restrições entre elementos** (restrição é uma relação entre dois ou mais elementos num modelo, cuja presença implica que esta deverá ser mantida em quaisquer modificações realizadas posteriormente) e nas **operações** utilizadas na obtenção de diferentes elementos geométricos (ver secção 4.6.4).

A terminologia e os conceitos utilizados neste texto estão já amplamente consagrados nas novas versões de normas ISO de grande utilização a nível industrial, dentre as quais se podem citar, a título de exemplo, a ISO 14405-1 – “Tamanhos lineares”, a ISO 1101 – “Toleranciamento geométrico” e a ISO 5459 – “Referências especificadas e sistemas de referências especificadas”, pelo que o seu conhecimento e a sua compreensão são fundamentais para os técnicos industriais que trabalham no domínio do desenvolvimento de produtos.

Ao considerar **a existência de elementos geométricos** (“*geometrical features*”) **nos domínios da definição nominal, da especificação e da verificação**, a nova linguagem GPS põe a descoberto a existência de conjuntos de operações duais, nos processos de especificação e de verificação, tornando possível harmonizar o conjunto de operações (anteriormente não referidas explicitamente) envolvidas nas especificações de tolerâncias com as operações utilizadas durante o controlo das peças.

Por outro lado, com o desenvolvimento de uma nova visão integrada da especificação e verificação, constatou-se que **a noção de incerteza**, atualmente bem enraizada no domínio da metrologia, **deveria ser generalizada para além da medição**. Nesse sentido, a ISO 17450-2 **formaliza as diferentes incertezas do conjunto dos elos da cadeia que assegura a passagem da necessidade funcional à mensuranda**, permitindo, desse modo, relativizar a importância das incertezas de implementação derivadas do meio de medição.

## 4.2 O conceito GPS

### 4.2.1 Contextualização

A **Especificação geométrica de produtos (GPS ISO)** é o sistema utilizado para definir os requisitos geométricos de peças (figura 4.1), em especificações de engenharia, e os requisitos para a sua verificação.

A **GPS ISO** permite assegurar a obtenção de algumas propriedades essenciais de um produto: **funcionalidade, segurança, fiabilidade e intermutabilidade**. Permite também expressar diferentes requisitos numa linguagem de geometria. No entanto, as propriedades a obter por via da utilização da

GPS não são propriamente de natureza geométrica, pelo que o caminho desde a GPS até aos parâmetros desejados para um dado dispositivo mecânico é indireto. A capacidade para “traduzir” os vários requisitos mecânicos em linguagem geométrica da Especificação geométrica de produtos deve ser uma das competências de um **projetista** [B1].

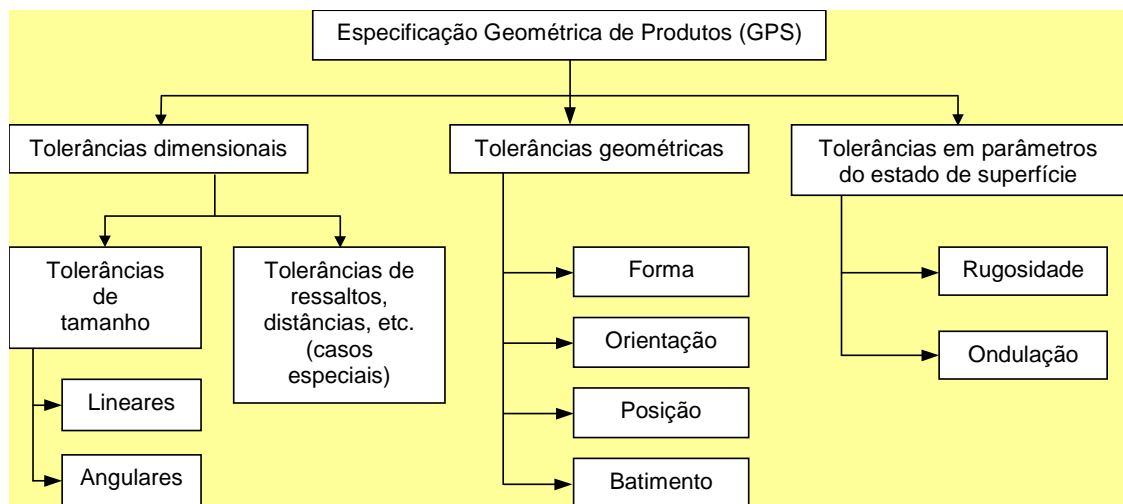
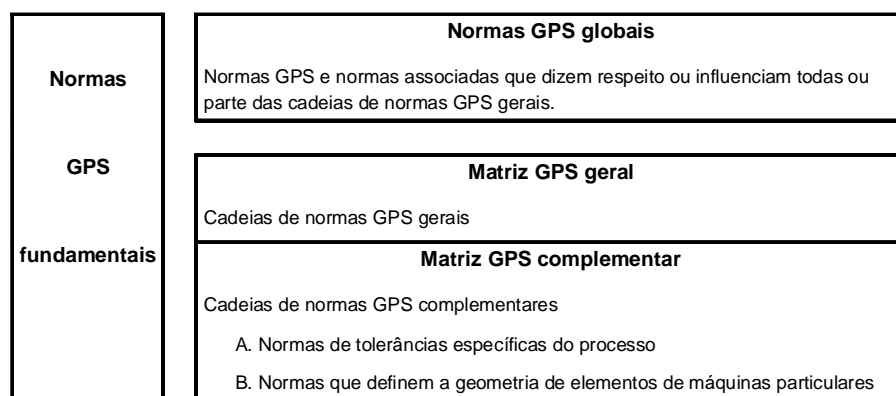


Figura 4.1 – Conceito geral de Especificação geométrica de produtos (GPS). Adaptada de [B1]

Para que a relação entre a peça imaginada pelo projetista, a peça fabricada e o conhecimento da peça obtido por medição – a peça real (ou peça extraída) – possa ser estabelecida e para permitir uma compreensão mútua entre os intervenientes neste processo, desenvolveram-se normas, no **domínio GPS**, tratando de definições de base, da representação simbólica, de princípios de medição, etc.

Com a criação do Comité técnico **ISO/TC 213**, em 1996, as **normas GPS** começaram por ser estruturadas seguindo um esquema diretor (ver quadro 4.1), apresentado no relatório técnico ISO/TR 14638:1995. O ISO/TC 213 estabeleceu então a base para uma nova estrutura ISO, em concordância com uma matriz GPS (ver quadro 4.2), fixada também no ISO/TR 14638, de modo a assegurar a harmonização das normas no domínio GPS.

Quadro 4.1 – O modelo da matriz GPS – Vista de conjunto do esquema diretor GPS (ISO/TR 14638:1995)



Após a utilização deste esquema diretor GPS durante 20 anos, a experiência mostrou que as normas GPS “globais” não se distinguiam, significativamente, tanto das normas GPS “fundamentais” como das “gerais”. Logo, com a publicação da norma ISO 14638, prevista para 2015, em substituição do ISO/TR 14638, o tipo de normas GPS “globais” vai ser eliminado e as normas deste tipo que não forem anuladas serão reclassificadas como normas GPS “fundamentais” ou “gerais” (ver quadro 4.3).

A “matriz GPS geral”, apresentada no quadro 4.2, é constituída por um conjunto de cadeias de normas GPS gerais. Em 1995, esta matriz era então formada por 18 linhas (cadeias de normas) que diziam respeito às diferentes “características geométricas” consideradas e por 6 colunas (os elos das cadeias) que correspondiam às considerações e requisitos técnicos julgados necessários para uma compreensão comum e inequívoca.

Quadro 4.2 – Matriz GPS geral reduzida (ISO/TR 14638:1995)

Número do elo da cadeia		1	2	3	4	5	6
Característica geométrica do elemento		Indicação na documentação do produto – Codificação	Definição de tolerâncias – Definição teórica e valores	Definições de características ou parâmetros do elemento real (ou extraído)	Avaliação dos desvios da peça – Comparação com os limites da tolerância	Requisitos para o equipamento de medição	Requisitos de calibração – normas para medições
1	Tamanho	...	...	...	...	...	...
2	Distância	...	...	...	...	...	...
3	Raio	...	...	...	...	...	...
4	Ângulo (tolerância em graus)	...	...	...	...	...	...
5	Forma de uma linha (independente de uma referência)	...	...	...	...	...	...
6	Forma de uma linha (dependente de uma referência)	...	...	...	...	...	...
7	Forma de uma superfície (independente de uma referência)	...	...	...	...	...	...
8	Forma de uma superfície (dependente de uma referência)	...	...	...	...	...	...
9	Orientação	...	...	...	...	...	...
10	Posição	...	...	...	...	...	...
11	Batimento circular	...	...	...	...	...	...
12	Batimento total	...	...	...	...	...	...
13	Referências	...	...	...	...	...	...
14	Perfil de rugosidade	...	...	...	...	...	...
15	Perfil de ondulação	...	...	...	...	...	...
16	Perfil primário	...	...	...	...	...	...
17	Defeitos de superfície	...	...	...	...	...	...
18	Arestas	...	...	...	...	...	...

Na nova norma ISO 14638, após algumas fusões, eliminações e acrescentos em relação às anteriores “características geométricas” consideradas, o sistema GPS ISO passou a identificar apenas os nove tipos de “propriedades geométricas” seguintes: tamanho, distância, forma, orientação, posição, batimento, estado de superfície (métodos do perfil), estado de superfície (métodos da superfície) e imperfeições de superfície. No entanto, no futuro, poderão vir a ser acrescentadas propriedades geométricas complementares.

As normas GPS relativas a uma “propriedade geométrica” particular estão agrupadas numa “categoria de propriedades geométricas” correspondente a cada uma das nove linhas (cadeias de normas) na “matriz de normas GPS ISO”, apresentada no quadro 4.4. Por sua vez, o número de colunas (os elos das cadeias) foi aumentado para 7, através da inclusão de uma coluna relativa à



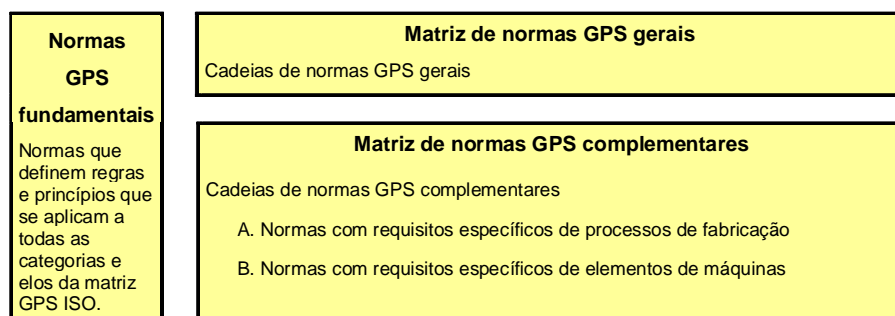
“conformidade e não conformidade”. Os títulos das colunas foram modificados de modo a adquirirem um carácter mais descritivo e as colunas deixaram de ser referenciadas por ordem numérica e passaram a sê-lo por ordem alfabética. Cada elo da cadeia engloba as normas GPS que dizem respeito a uma função particular, na especificação ou na verificação de uma propriedade geométrica.

#### 4.2.2 A atual estrutura do conceito de especificação geométrica de produtos

##### O conceito GPS:

- Cobre vários tipos de normas. Uma definem regras e princípios fundamentais para a especificação (**normas GPS fundamentais**), outras aplicam-se a uma ou mais categorias de propriedades geométricas (**normas GPS gerais**) e outras referem-se a categorias não geométricas (**normas GPS complementares**), ver quadro 4.3.
- Cobre vários tipos de propriedades geométricas, tais como tamanho, distância, forma, orientação, posição, estados de superfície, etc. (**normas GPS gerais**).
- Trata de requisitos específicos de alguns processos de fabricação (fundição, soldadura, etc.) e de alguns elementos de máquinas (roscas, rodas dentadas, etc.) (**normas GPS complementares**).
- Intervém em diferentes fases do desenvolvimento de um produto: especificação, fabricação, medição, avaliação da conformidade, etc.

Quadro 4.3 – Modelo da matriz de normas GPS – Vista de conjunto do novo esquema diretor GPS (ISO 14638)



As **normas GPS fundamentais** definem regras e princípios fundamentais que se aplicam a todas as categorias (categorias de propriedades geométricas e outras) e a todos os elos da cadeia, na matriz GPS ISO, podendo referir-se, a título de exemplo, como pertencente a este tipo, a norma ISO 8015 – “Princípios fundamentais – Conceitos, princípios e regras”.

As **normas GPS gerais** aplicam-se a uma ou mais categorias de propriedades geométricas e a um ou mais elos da cadeia, na matriz GPS ISO (ver quadro 4.4), mas não são normas GPS fundamentais, podendo indicar-se, como exemplos, as normas ISO 14405-1 – “Toleranciamento dimensional – Parte 1: Tamanhos lineares”; ISO 1101 – “Toleranciamento geométrico”; ISO 1302 – “A indicação dos estados de superfície na documentação técnica de produtos”; etc.

As **normas GPS complementares** referem-se a processos de fabricação específicos, tal como, p. ex., a série de normas ISO 8062 – “Tolerâncias dimensionais e geométricas de peças moldadas”; etc., ou a elementos de máquinas específicos, tal como, p. ex., a série de normas ISO 965 – “Roscas métricas ISO para usos gerais – Tolerâncias”; etc.

Na **matriz de normas GPS gerais** e na **matriz de normas GPS complementares**, indicadas no quadro 4.3, o conjunto de normas relativas à mesma categoria de propriedades designa-se por **cadeia de normas** (ver exemplos no quadro 4.4). Cada norma individual pertencente a um elo da cadeia afeta as outras normas, pelo que a compreensão global e a aplicação de cada uma das normas requer o conhecimento das outras normas da cadeia.

A **matriz de normas GPS gerais** é o conjunto de cadeias das correspondentes normas GPS (ver quadro 4.4). As linhas (cadeias) desta matriz dizem respeito às diferentes “categorias de propriedades geométricas” e as colunas agrupam os elos das cadeias que englobam as normas GPS relativas a uma função particular, na especificação ou na verificação de uma propriedade geométrica, tais como “os símbolos a utilizar” ou a “medição da propriedade”. Cada célula da matriz (elo) deve ser coberta pelo conteúdo de, pelo menos, uma norma.

Nesta matriz, cada categoria poderá ser posteriormente subdividida num número de elementos mais específicos, cada um deles identificando uma cadeia de normas. Assim, por exemplo, a categoria da propriedade geométrica “tamanho” pode ser subdividida em “tamanho de cilindros”, “tamanho de cones”, “tamanho de esferas”, etc., cada uma das quais correspondendo a uma cadeia de normas. Os “ângulos” são cobertos pelas propriedades de “tamanho” e de “distância” e os “raios” são cobertos pela propriedade de “tamanho”.

Quadro 4.4 – Matriz de normas GPS gerais (ISO 14638)

Categorias de propriedades geométricas	Elos da cadeia						
	A	B	C	D	E	F	G
	Símbolos e indicações	Requisitos dos elementos	Propriedades dos elementos	Conformidade e não conformidade	Medição	Equipamento de medição	calibração
Tamanho	ISO 14405-1 ISO 286-1	ISO 14405-1 ISO 286-1 ISO 286-2 ISO 1829	ISO 286-1 ISO 1938 Série ISO 16610 ISO 14405-1	ISO/TR 16015 Série ISO 14253	ISO 1938	ISO 463 ISO 3599 ISO 6906 ISO 3650 ISO/PAS 12868 ISO/TR 16015 ISO/TS 23165 Série ISO 14253 Série ISO 10360	ISO/TS 15530-3 ISO/TS 15530-4 ISO/TR 16015 Série ISO 16610 Série ISO 14253
Distância	...	...	...	...	...	...	...
Forma	...	...	...	...	...	...	...
Orientação	...	...	...	...	...	...	...
Posição	...	...	...	...	...	...	...
Batimento	...	...	...	...	...	...	...
Estado de superfície (métodos do perfil)	...	...	...	...	...	...	...
Estado de superfície (métodos da superfície)	...	...	...	...	...	...	...
Imperfeições de superfície	...	...	...	...	...	...	...

A **matriz de normas GPS complementares** é o conjunto de cadeias das correspondentes normas GPS que podem ser organizadas de um modo análogo à disposição das normas GPS gerais,

ilustrada no quadro 4.4. Logo, as categorias de processos de fabricação e de elementos de máquinas poderão também ser subdivididas em cadeias de normas correspondentes a diferentes tipos de processos de fabricação e de elementos de máquinas.

Os sete elos de uma cadeia de normas GPS ISO, indicados no quadro 4.4, permitem passar progressivamente do aspeto simbólico de uma tolerância (a sua indicação na documentação técnica), até aos requisitos de calibração do instrumento de medição:

**Elo A – Símbolos e indicações:** engloba as normas que definem a forma e as proporções dos símbolos, indicações e modificadores e regras que regem a sua utilização (caligrafia, sintaxe e gramática [S2]).

**Elo B – Requisitos dos elementos:** reúne as normas que definem características de tolerância, zonas de tolerância, restrições e parâmetros. Inclui normas que definem características geométricas, propriedades de tamanho, parâmetros de estado de superfície, a forma, o tamanho, a orientação e a posição de zonas de tolerância e as definições dos parâmetros.

**Elo C – Propriedades dos elementos:** engloba as normas que definem as características e condições dos elementos geométricos numa peça. Inclui normas que definem operações de partição, extração, filtragem, associação, coleção e construção (ver secção 4.6.4 deste texto).

**Elo D – Conformidade e não conformidade:** reúne as normas que definem os requisitos para a comparação entre os requisitos de especificação e os resultados de verificação. Inclui a definição de valores por omissão (“*by default*”), regras para a conformidade e não conformidade e normas que tratam da incerteza.

**Elo E – Medição:** engloba as normas que definem os requisitos para a medição das características e condições dos elementos geométricos.

**Elo F – Equipamento de medição:** reúne as normas que definem os requisitos para o equipamento utilizado na medição.

**Elo G – Calibração:** engloba as normas que definem os requisitos para a calibração e os procedimentos de calibração para o equipamento de medição.

Na página *web* da Matriz GPS (<http://isotc213.ds.dk/>) poder-se-á encontrar informação atualizada sobre normas específicas ou grupos de normas relativas a uma dada característica geométrica ou a um determinado elo de uma cadeia. No futuro, poderão ser acrescentadas categorias de propriedades geométricas suplementares e outras cadeias, de modo a refletir a evolução dos processos de fabricação e de inspeção, bem como outros requisitos industriais.

O modelo da matriz de normas GPS, do quadro 4.3, e a matriz de normas GPS gerais, do quadro 4.4, facilitam uma melhor compreensão do conceito GPS, por parte dos utilizadores industriais, e podem ajudar os normalizadores a resolver as necessidades de normalização neste domínio. Por sua vez, a página *web* da Matriz GPS e o endereço ([http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue)

[tc\\_browse.htm?commid=54924&published=on](#)), no sítio web da ISO, permitem fazer a identificação das normas existentes e das normas em preparação, no domínio das normas GPS gerais e complementares, e ir registando as principais lacunas a colmatar.

### 4.3 Elementos geométricos

Genericamente, pode considerar-se que um produto é constituído por vários subconjuntos, sendo cada um destes formado por diferentes peças. Por sua vez, as peças são limitadas por elementos geométricos de superfície que estão sujeitos a várias condições (restrições).

As ambiguidades decorrentes da definição de peça, que podem ser constatadas a nível industrial, fizeram com que as normas centrassem a sua abordagem nos elementos geométricos, partindo-se daí para a especificação de peças ou produtos, conforme necessário.

#### 4.3.1 Alguns termos gerais e definições

Em termos gerais, um **elemento geométrico** (*“geometrical feature”*) pode ser um ponto, uma linha, uma superfície, um volume ou um conjunto destes elementos. Os elementos geométricos podem ser classificados em **elementos ideais e não ideais**, podendo também ser agrupados em elementos simples ou compostos, que podem ser constituídos por conjuntos infinitos (contínuos) ou finitos (discretos) de pontos. De acordo com a sua definição, um **elemento simples** pode ser um ponto, uma linha ou uma superfície. Por sua vez, um **elemento composto** é uma coleção de elementos. As normas ISO 17450-1 e ISO 22432 definem vários elementos geométricos existentes em três domínios:

- No **domínio da definição nominal**, onde uma representação ideal da futura peça é definida pelo projetista (p. ex.: o modelo da superfície nominal, ver secção 4.6.3);
- No **domínio da especificação**, em que o projetista tem em mente várias representações da futura peça (p. ex.: o modelo da superfície não ideal e o modelo da superfície discreta, ver secção 4.6.3);
- No **domínio da verificação**, onde uma ou várias representações de uma dada peça são identificadas na aplicação do procedimento ou dos procedimentos de medição (p. ex.: o modelo da superfície amostrada ou a própria superfície real da peça, ver secção 4.6.3).

Partindo, a título de exemplo, de um elemento de superfície cilíndrica, podem considerar-se os vários tipos de elementos representados na figura 4.2. Um **elemento integral nominal** é um elemento ideal do modelo de superfície definido na documentação técnica do produto (p. ex. um desenho técnico), sendo o seu eixo designado de **elemento derivado nominal**, uma vez que resulta daquele [ver figura 4.2 a)]. Estes elementos ideais fazem parte de um **modelo da superfície nominal** definido pelo projetista (ver figura 4.3).

O **elemento real (integral)** é um elemento constitutivo da superfície real da peça, limitado pelos elementos reais adjacentes [ver figura 4.2 b)]. Como este elemento é geometricamente imperfeito, o projetista não consegue prever a geometria total da sua superfície, de modo a ter uma percepção completa da extensão das suas variações. Para ultrapassar esta limitação, concebe um elemento não ideal da superfície para representar o elemento real da peça [ver figura 4.2 b)]. Este elemento é formado por um número infinito de pontos, mas apenas um subconjunto finito destes será usado para fins de medição. Este elemento não ideal faz parte de um **modelo da superfície não ideal** imaginado pelo projetista (ver figura 4.8). A representação aproximada do elemento não ideal, obtida por extração de um número finito dos seus pontos, é denominada de **elemento integral extraído**, sendo a sua linha mediana designada de **elemento derivado extraído**, uma vez que resulta daquele [ver figura 4.2 c)].

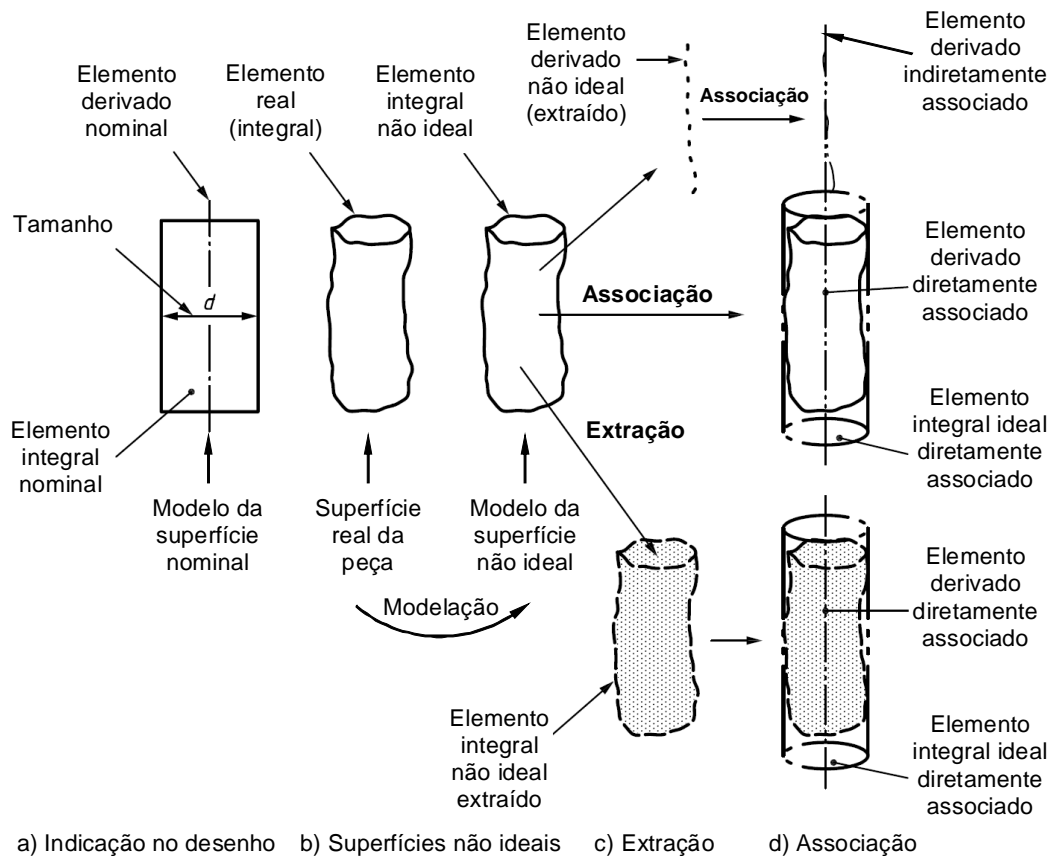


Figura 4.2 – Relações entre elementos geométricos. Adaptada da ISO 17450-1

Finalmente, o **elemento integral associado** é um elemento de forma perfeita (elemento ideal) que é ajustado ao elemento integral extraído ou ao próprio elemento real (integral) (ver normas ISO 5459 e ISO 22432), de acordo com convenções especificadas, sendo o seu eixo ou outra entidade considerada adequada designado de **elemento derivado associado**, uma vez que resulta daquele [ver figura 4.2 d)]. O elemento integral associado é um elemento do mesmo tipo (neste caso, um cilindro) do elemento integral nominal.

Um elemento derivado (linha mediana) indiretamente associado é um **elemento de substituição** (elemento ideal único que é associado a um elemento não ideal) da linha mediana não ideal. Um elemento derivado (linha mediana) diretamente associado é um elemento de situação do elemento de substituição do elemento integral, ver norma ISO 22432.

Estes elementos são bem adaptados para a especificação de peças e montagens rígidas, mas poderão também ser aplicados a peças e montagens não rígidas por via da especificação das variações admissíveis em relação aos sólidos rígidos.

### 4.3.2 Elementos geométricos ideais

Um **elemento ideal** é um elemento definido por uma **equação paramétrica**, cuja expressão depende do **tipo** de elemento (nome dado a um conjunto de formas de um elemento ideal, p. ex.: linha reta, plano, cilindro, cone, esfera ou toro) e da(s) sua(s) **característica(s) intrínseca(s)** (ver secção 4.4.1). As denominações de cilindro, de cone, etc., utilizadas ao longo do texto, empregam-se, neste contexto, para designar, respetivamente, uma superfície cilíndrica, uma superfície cônica, etc. Os elementos ideais podem ser **nominais** (ver figura 4.3) ou **associados**.

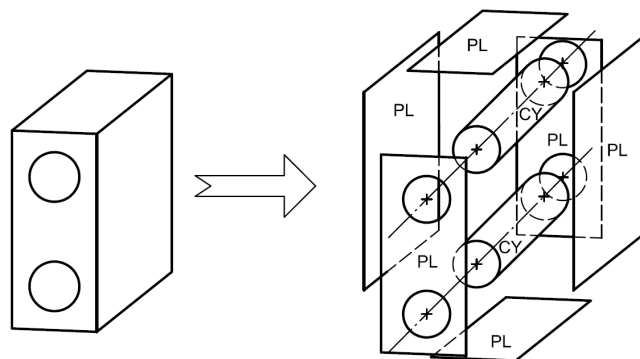


Figura 4.3 – Exemplo de modelo da superfície nominal e seus elementos ideais constituintes (ISO 17450-1)

Os elementos nominais têm uma extensão finita e os elementos associados, por omissão, são infinitos, caso contrário são qualificados como restritos.

#### 4.3.2.1 Classificação dos elementos geométricos ideais

A ISO estabeleceu uma classificação dos elementos geométricos ideais, baseada na noção de simetria e na definição matemática de grupo de simetria [S3, B3], que desempenha um papel relevante na nova linguagem de especificação geométrica em desenvolvimento. Neste âmbito, um **grupo de simetria** pode ser definido como o conjunto de movimentos de corpo rígido (transformações) que deixa um elemento geométrico invariante no espaço. Assim, todos os elementos ideais podem ser englobados numa das sete **classes de invariância**, definidas, no quadro 4.5, com base no seu grupo de simetria (ISO 17450-1).

Quadro 4.5 – Quadro das classes de invariância (ISO 17450-1)

Classe de invariância <sup>1)</sup>	Superfície (exemplos)	Graus de invariância <sup>2)</sup>	
Complexa		Nenhum (nem translação nem rotação)	0
Prismática		1 translação ao longo de uma linha reta	1
De revolução		1 rotação em torno de uma linha reta	1
Helicoidal		1 translação e 1 rotação combinadas em torno de uma linha reta	1
Cilíndrica		1 translação ao longo e 1 rotação em torno de uma linha reta	2
Plana		1 rotação em torno de uma linha reta e 2 translações num plano perpendicular à linha reta	3
Esférica		3 rotações em torno de um ponto	3

1) Uma **classe de invariância** é um grupo de elementos ideais definido pelo mesmo grau de invariância.

2) Um **grau de invariância** de um elemento ideal é(são) o(s) deslocamento(s) do elemento ideal para o(s) qual(ais) este permanece idêntico (invariante) no espaço. Corresponde aos graus de liberdade não restringidos (movimentos de corpo rígido) utilizados em cinemática.

**Nota:** Neste contexto, todas as superfícies cilíndricas de diretriz não circular são classificadas como prismáticas.

A coluna 3, do quadro 4.5, fornece o conjunto de movimentos de corpo rígido (graus de liberdade não restringidos) sob o qual o elemento geométrico, indicado na coluna 2, permanece invariante no espaço. Assim, por exemplo:

- Um prisma com secção elítica fica invariante no espaço por via de uma translação ao longo de uma linha reta; pertence à classe de invariância prismática.
- Um cone permanece invariante no espaço após uma rotação em torno do seu eixo (ver figura 4.4); pertence à classe de invariância de revolução.
- Um cilindro fica invariante no espaço, quer por translação ao longo do seu eixo, quer por rotação em torno deste; pertence à classe de invariância cilíndrica.

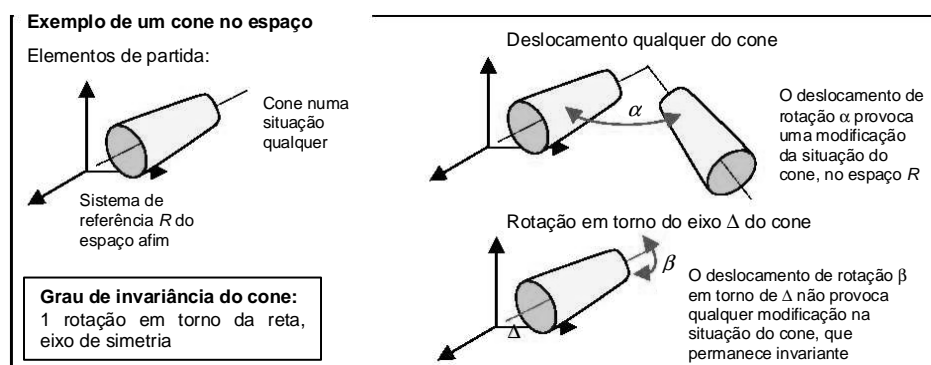









Figura 4.4 – Exemplo de um cone no espaço – classe de invariância de revolução. Adaptada de [C1]

Por sua vez, a **situação espacial** (orientação e/ou posição) de cada elemento ideal pode ser definida a partir de um ou mais **elementos de situação**, que são elementos simples do tipo ponto, linha reta, plano ou hélice. Cada conjunto de elementos de situação pertence à mesma classe de invariância do elemento ideal do qual é derivado. No quadro 4.6, apresentam-se exemplos de elementos de situação.

Quadro 4.6 – Exemplos de elementos de situação de elementos ideais (ISO 17450-1)

Classe de invariância	Exemplos de tipos de superfícies	Exemplos de elementos de situação	
<b>Complexa</b>	Curva elítica Parabolóide hiperbólico Superfície de Bézier baseada numa nuvem não estruturada de pontos no espaço [F1, B2] ...		Plano da elipse, planos de simetria Planos de simetria, ponto tangente Plano Linha reta Ponto ...
<b>Prismática</b>	Prisma com uma base pentagonal Prisma com uma base elítica ...		Plano Linha reta
<b>De revolução</b>	Círculo Cone Toro ...		O plano e o centro do círculo A linha de eixo e vértice O plano perpendicular ao eixo do toro e o centro do toro ...
<b>Helicoidal</b>	Linha helicoidal Superfície helicoidal com uma base em evolvente de círculo ...		Hélice Hélice ...
<b>Cilíndrica</b>	Linha reta Cilindro		A linha reta <sup>1)</sup> O eixo de revolução <sup>1)</sup>
<b>Plana</b>	Plano		O plano
<b>Esférica</b>	Ponto Esfera		O ponto <sup>1)</sup> O centro <sup>1)</sup>

1) Não pode ser escolhido qualquer outro elemento de situação alternativo, pois tal resultaria numa classe de invariância diferente para o elemento considerado.

Legenda: • - Ponto; / - Linha reta; // - Plano

De acordo com o quadro 4.6, apenas nos casos de elementos das classes cilíndrica e esférica, a definição dos elementos de situação é única. Nos restantes casos, em termos matemáticos, são possíveis várias escolhas alternativas, devendo ser selecionada uma delas, de acordo com as necessidades funcionais de cada caso, ver exemplos na figura 4.5.

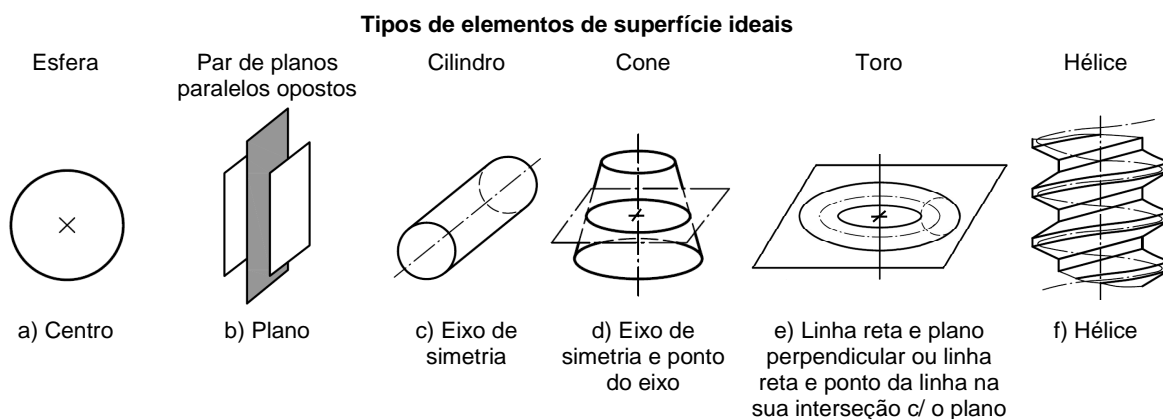


Figura 4.5 – Alguns exemplos de elementos de situação de elementos ideais (ISO 17450-1)



A figura 4.6 ilustra o caso de um cone situado de um modo completo no espaço, a partir de dois elementos de situação, uma reta (o eixo do cone) e um ponto (o seu vértice, neste exemplo), com a situação definida através das respectivas características de situação (distâncias e ângulos), ver secção 4.4.2.

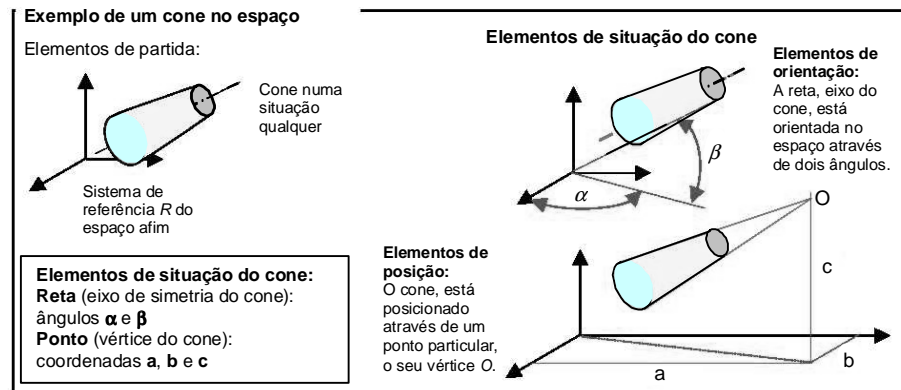


Figura 4.6 – Exemplo de um cone no espaço – elementos de situação. Adaptada de [C1]

### 4.3.2.2 Elementos compostos

Um **elemento composto** é uma coleção de elementos simples considerados em conjunto, em concordância com a função da peça [ver figuras 4.7 e 4.5 b)]. **Todos os elementos compostos ideais caem dentro de uma das sete classes de invariância**, indicadas no quadro 4.5, de acordo com o esquema indicado no quadro 4.7.

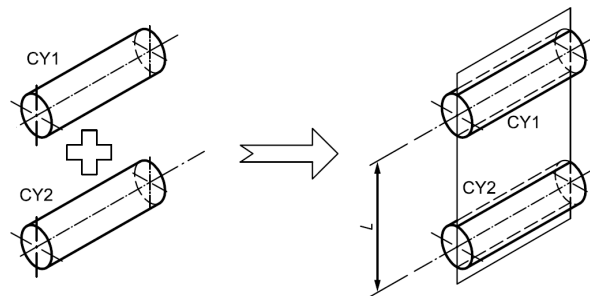


Figura 4.7 – Exemplo de um elemento composto (ISO 17450-1)

Uma coleção de elementos pode dar origem a um **elemento composto** com um tipo e um grau de invariância diferentes dos relativos aos seus elementos simples componentes. Um **elemento simples** é um elemento contínuo para o qual não existe qualquer subconjunto da mesma natureza (ponto, linha ou superfície) com grau de invariância maior do que o grau de invariância do elemento considerado.

Na figura 4.7, dois cilindros paralelos são considerados em conjunto [p. ex. para construir uma **referência especificada comum** (“*common datum*”), a utilizar no toleranciamento geométrico (ISO 5459), ver figura 4.22]. Cada um dos cilindros é um elemento simples, mas a sua coleção já não o é. O elemento composto pela coleção dos dois cilindros apenas permanece invariante no espaço por translação ao longo de uma linha reta, pertencendo à classe de invariância prismática (ver quadro 4.5).

No quadro 4.7, apresenta-se uma **classificação dos vários elementos compostos**, que podem ser constituídos a partir da **coleção de pares de elementos simples** pertencentes a diferentes classes de invariância [C2, C3, S1]. Os elementos da classe de invariância “helicoidal” não foram considerados. Esta classificação é elaborada com base nas situações relativas do(s) elemento(s) de situação dos elementos componentes.

Qualquer **elemento composto**, resultante da coleção de  $n$  elementos geométricos, pode ser classificado numa das sete classes de invariância, através da **aplicação recursiva** das classificações de pares de elementos [S4].

Como cada conjunto de elementos de situação pertence à mesma classe de invariância do elemento do qual é derivado, **a situação relativa (orientação e/ou posição)** de elementos ou coleções de elementos é a mesma do(s) seu(s) elemento(s) de situação.

Quadro 4.7 – Coleções de pares de elementos – sua classificação em classes de invariância [S1]

Reclassificação COLEÇÃO de elementos	Complexa 	Prismática 	De revolução 	Cilíndrica 	Plana 	Esférica 
Complexa 						
Prismática 						
De revolução 						
Cilíndrica 						
Plana 						
Esférica 						

**Legenda:** P: Plano; D: Linha reta; O: Ponto (elementos de situação);  
símbolos //, ⊥, ⊙: paralelos, perpendiculares e coaxiais.

Assim, em praticamente todos os casos, a situação relativa de dois quaisquer conjuntos arbitrários de objetos geométricos pode ser definida através da consideração de, apenas, duas coleções de pontos, linhas retas e planos. Este facto justifica a utilização dos **elementos de situação** das superfícies associadas no estabelecimento de referências especificadas (“*datums*”), no âmbito do toleranciamento geométrico [S3, S4] (ver exemplos na norma ISO 5459). Em teoria, podiam considerar-se todos os casos incluindo as hélices, no entanto, elas são pouco utilizadas, na prática, para fins de referência, sendo substituídas pelo seu eixo central.

A norma ISO 22432 define, de um modo mais completo, a terminologia normalizada para os diferentes elementos geométricos, principalmente nos domínios da especificação e da verificação, e para a comunicação das relações entre estes domínios.

### 4.3.3 Elementos geométricos não ideais

Um **elemento não ideal** é um **elemento geometricamente imperfeito** completamente dependente do modelo de superfície não ideal (ver secção 4.6.3) ou da superfície real da peça e, por omissão, tem uma dimensão finita. Pode ser o próprio modelo de superfície não ideal; parte do modelo de superfície não ideal (elementos de partição, ver quadro 4.11); elementos de partição derivados (ver figura 4.8) ou a interseção entre o modelo de superfície não ideal e um elemento ideal.

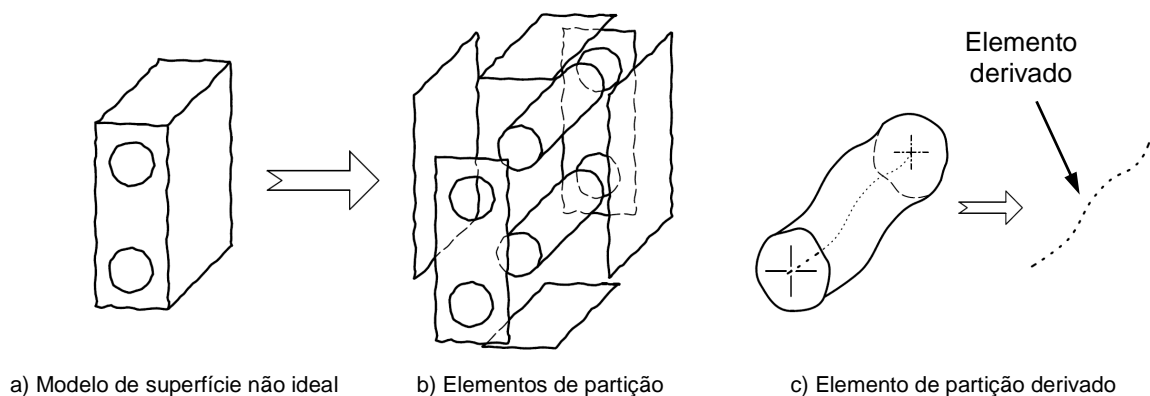


Figura 4.8 – Exemplos elementos não ideais (ISO 17450-1)

Os elementos não ideais são limitados e compostos por um conjunto infinito ou finito de pontos.

## 4.4 Características

No domínio da geometria, uma **característica** é uma propriedade simples (parâmetro), definida a partir de um ou mais elementos geométricos, que pode ser expressa em unidades de comprimento ou de ângulo. O diâmetro de um cilindro, a distância entre um plano e o centro de uma esfera, ou o ângulo entre o eixo de um cilindro e um plano são exemplos de características.

De acordo com esta definição, as características geométricas (de forma, de orientação e de posição), por exemplo, são características, uma vez que são definidas através de funções matemáticas das características (as distâncias máximas entre elementos ideais e não ideais). Os parâmetros de estado de superfície (ondulação e rugosidade) também podem ser considerados como características. Estes conceitos são objeto de uma abordagem desenvolvida na norma ISO 25378.

As características (geométricas) de base podem ser **intrínsecas** (definidas nos elementos ideais) ou **de situação** (definidas entre dois elementos). Assim, por exemplo, no modelo geométrico nominal,

representado na figura 4.3, os diâmetros dos cilindros são características intrínsecas e a orientação e a posição dos elementos são definidas por características de situação.

#### 4.4.1 Características intrínsecas de elementos ideais

As **características intrínsecas** são parâmetros da equação paramétrica de um elemento ideal, sendo específicas para o tipo do elemento. No quadro 4.8 e na figura 4.9, são dados exemplos de características intrínsecas.

Quadro 4.8 – Exemplos de características intrínsecas de elementos ideais (ISO 17450-1)

Classe de invariância	Tipo	Exemplos de características intrínsecas
<b>Complexa</b>	Curva elítica Superfície definida por pólos (pontos de controle) [F1, B2] ...	Comprimentos dos eixos maior e menor Posição relativa dos pólos ...
<b>Prismática</b>	Prisma com uma base elítica Prisma com uma base de evolvente de círculo ...	Comprimentos dos eixos maior e menor Ângulo de pressão, raio de base ...
<b>De revolução</b>	Círculo Cone Toro ...	Diâmetro Ângulo no vértice Diâmetros da geratriz e da diretriz ...
<b>Helicoidal</b>	Linha helicoidal Superfície helicoidal com uma base de evolvente de círculo ...	Passo da hélice e raio Ângulo da hélice, ângulo de pressão, raio de base ...
<b>Cilíndrica</b>	Linha reta Cilindro	Nenhuma Diâmetro
<b>Plana</b>	Plano	Nenhuma
<b>Esférica</b>	Ponto Esfera	Nenhuma Diâmetro

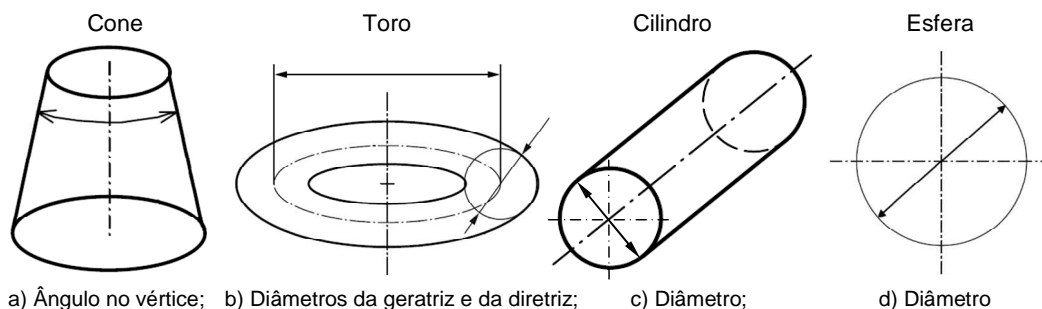


Figura 4.9 – Alguns exemplos de características intrínsecas de elementos ideais (ISO 25378)

As características intrínsecas de um elemento de superfície correspondem às características geométricas que permanecem invariantes, quando o elemento geométrico é submetido a qualquer movimento de corpo rígido [S6].

#### 4.4.2 Características de situação entre elementos de situação

**A(s) característica(s) de situação** entre elementos de situação define(m) a **posição** ou a **orientação** relativa entre dois desses elementos. **Estas características são distâncias ou ângulos.** As características de situação (ver quadro 4.9) podem ser separadas em **características de posição** (figura 4.10) e **características de orientação** (figura 4.11).

Quadro 4.9 – Características de situação (ISO 17450-1)

Posição	Orientação
Distância ponto – ponto	Ângulo linha reta – linha reta
Distância ponto – linha reta	Ângulo linha reta – plano
Distância ponto – plano	Ângulo plano – plano
Distância linha reta – linha reta	
Distância linha reta – plano	
Distância plano – plano	

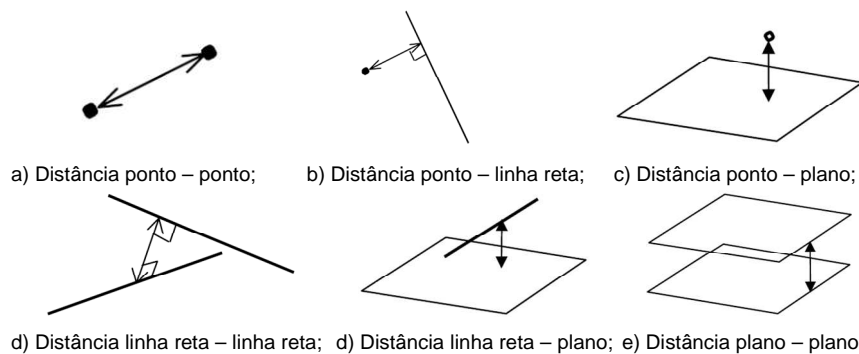


Figura 4.10 – Características de posição entre elementos de situação (ISO 25378)

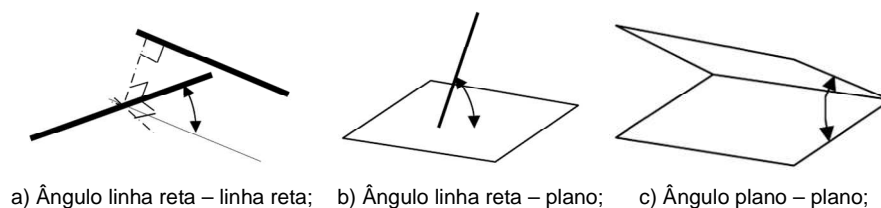


Figura 4.11 – Características de orientação entre elementos de situação (ISO 25378)

Alguns exemplos de características de situação entre elementos de situação:

- A posição relativa entre uma esfera e um plano é dada pela **distância ponto – plano** entre o elemento de situação da esfera (o centro da esfera) e o elemento de situação do plano (o próprio plano).
- A orientação relativa entre um cilindro e um plano é dada pelo **ângulo linha reta – plano** entre o elemento de situação do cilindro (o eixo do cilindro) e o elemento de situação do plano (o próprio plano).

Uma característica de situação entre dois elementos transforma-se numa característica intrínseca do elemento composto (p. ex. a distância  $L$  indicada na figura 4.7).

Em alguns casos (p. ex. de toleranciamento assimétrico), é necessário identificar uma parte do espaço (p. ex. para identificar em que lado de um plano de simetria está a parte maior da zona de tolerância). As características de situação correspondentes são designadas por **características assinaladas** (*"signed characteristics"*), ver figura 4.12. Estas características podem ser as seguintes: uma distância ponto – plano, uma distância linha reta – linha reta (não paralelas), uma distância linha reta – plano, uma distância plano – plano, um ângulo linha reta – linha reta, um ângulo linha reta – plano e um ângulo plano – plano.

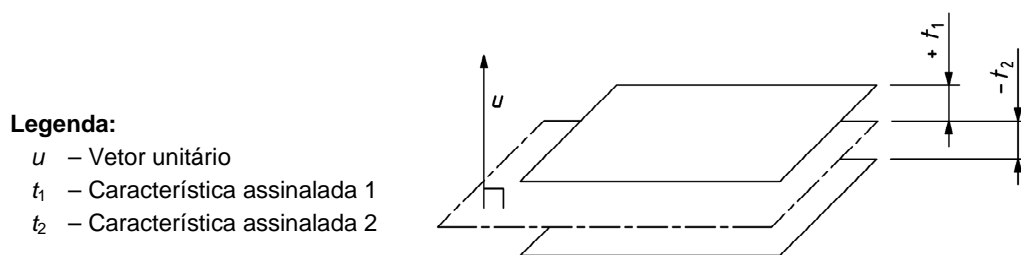


Figura 4.12 – Características assinaladas (ISO 17450-1)

Estas características assinaladas são definidas por vetores dependentes da orientação do plano e da linha reta. Ver também a norma ISO 25378 e o projeto de norma ISO/DIS 17450-4.

#### 4.4.3 Características de situação entre elementos ideais e não ideais

As características de situação são também utilizadas para definir a situação entre elementos não ideais e elementos ideais. São apenas distâncias e são definidas como funções das distâncias entre cada ponto do elemento não ideal e o elemento ideal (ver exemplo na figura 4.13). Estas funções podem ser, por exemplo, a distância máxima, a distância mínima ou a soma dos quadrados das distâncias de cada ponto ao elemento ideal, etc.

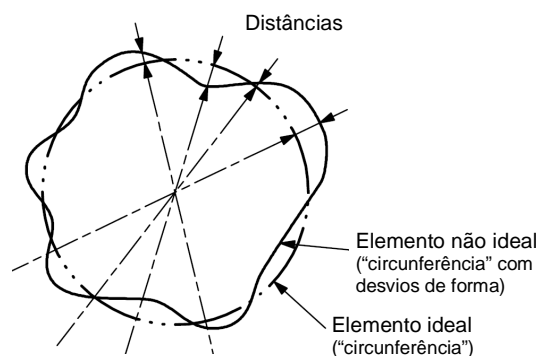


Figura 4.13 – Características de situação entre elementos ideais e não ideais (ISO 17450-1)

Estas características de situação serão **utilizadas em operações de associação** (ver secção 4.6.4).

#### 4.4.4 Parametrização da situação relativa entre elementos geométricos

Na definição da parametrização da situação relativa entre dois elementos geométricos (ideais)  $E_{i1}$  e  $E_{i2}$  considerados em conjunto, o número de **características de situação** (NCS) – parâmetros independentes também conhecidos como graus de liberdade relativos a restringir – necessárias para esse efeito pode ser determinado através da expressão [S4]:

$$\text{NCS} = 6 - [\text{NID}(E_{i1}) + \text{NID}(E_{i2}) - \text{NID}(E_{i1}, E_{i2})] \quad (4.1)$$

em que  $\text{NID}(E_i)$  e  $\text{NID}(E_{i1}, E_{i2})$  são, respetivamente, o número de graus de invariância (“*number of invariance degrees*” – graus de liberdade não restringidos) do elemento  $E_i$  e do par de elementos  $(E_{i1}, E_{i2})$ , indicados, na quarta coluna do quadro 4.5, para cada classe de invariância.

Este cálculo não dita quais devem ser as características de situação – apenas determina quantas são possíveis. Tal deve-se, obviamente, ao facto de **a parametrização não necessitar de ser única – o mesmo conjunto poderá ser parametrizado de várias formas, todas elas válidas**. A fórmula indicada é útil, muitas vezes, na verificação, *a posteriori*, da parametrização da situação relativa.

Uma vez que, a partir das suas classes de invariância, os elementos de situação dos elementos  $E_{i1}$  e  $E_{i2}$  são já conhecidos, pode dispor-se de uma lista de parametrizações possíveis, pré-selecionadas, das suas situações relativas (ver quadro 4.10).

Quadro 4.10 – Graus de liberdade a restringir entre duas classes de invariância [S1]

Graus de liberdade a restringir T: translação R: rotação	Complexa 	Prismática 	De revolução 	Cilíndrica 	Plana 	Esférica 
Complexa 	3T 3R	2T 3R	3T 2R	2T 2R	1T 2R	3T 0R
Prismática 	2T 3R	D1 // D2 2T 3R 1T 3R	2T 2R	D1 // D2 2T 2R 1T 2R	D1 // P2 1T 2R 0T 2R	2T 0R
De revolução 	3T 2R	2T 2R	D1 ⊙ D2 3T 2R D1 // D2 2T 2R D1 ≠ D2 2T 3T 1R	D1 ⊙ D2 2T 2R D1 // D2 1T 2R D1 ≠ D2 2T 2T 1R	D1 ⊥ P2 1T 2R 1T 1R	D1 ⊙ O2 3T 0R 2T 0R
Cilíndrica 	2T 2R	D1 // D2 2T 2R 1T 2R	D1 ⊙ D2 2T 2R D1 // D2 1T 2R D1 ≠ D2 2T 2T 1R	D1 ⊙ D2 2T 2R D1 // D2 1T 2R D1 ≠ D2 2T 1T 1R	D1 // P2 1T 1R D1 ⊥ P2 0T 2R 0T 1R	D1 ⊙ O2 2T 0R 1T 0R
Plana 	1T 2R	P1 // D2 1T 2R 0T 2R	P1 ⊥ D2 1T 2R 1T 1R	P1 // D2 1T 1R P1 ⊥ D2 0T 2R 0T 1R	P1 // P2 1T 2R 0T 1R	1T 0R
Esférica 	3T 0R	2T 0R	O1 ⊙ D2 3T 0R 2T 0R	O1 ⊙ D2 2T 0R 1T 0R	1T 0R	O1 ⊙ O2 3T 0R 1T 0R

**Legenda:** P: plano; D: linha reta; O: ponto T: translação; R: totação  
símbolos //, ⊥, ⊙: paralelos, perpendiculares e coaxiais.

O quadro 4.10 permite caracterizar os graus de liberdade a restringir (**características de situação**) entre dois elementos de diferentes classes de invariância [S1]. Cada característica indicada (T e R) é uma medida de comprimento ou uma medida angular. O número de graus de liberdade a restringir é quantitativo. As direções dos graus de liberdade devem ser expressas num referencial criteriosamente estabelecido a partir das direções principais dos elementos pertencentes às duas classes de invariância consideradas.

A título de exemplo, analisem-se os três elementos compostos distintos, apresentados na figura 4.14, constituídos a partir de pares de elementos simples da classe cilíndrica. De acordo com o quadro 4.7, cada um dos **elementos compostos** considerados pertence a uma classe de invariância diferente (complexa, prismática ou cilíndrica). Por outro lado, com base na expressão (4.1), é possível determinar o número de características de situação (NCS) necessárias para a definição da situação relativa entre os elementos simples (ver também o quadro 4.10).

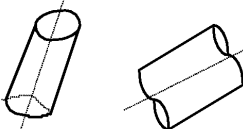
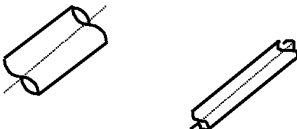
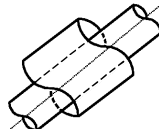
 <p>Classe de invariância complexa</p> $\text{NCS} = 6 - (2+2-0) = 2$ <p>1 comprimento e 1 ângulo</p>	 <p>Classe de invariância prismática</p> $\text{NCS} = 6 - (2+2-1) = 3$ <p>1 comprimento e 2 ângulos</p>	 <p>Classe de invariância cilíndrica</p> $\text{NCS} = 6 - (2+2-2) = 4$ <p>2 comprimentos e 2 ângulos</p>
a) Dois elementos cilíndricos com os eixos enviesados	b) Dois elementos cilíndricos com os eixos paralelos	c) Dois elementos cilíndricos com os eixos coaxiais

Figura 4.14 – Exemplos de classificação de pares de elementos cilíndricos e determinação do respetivo número de características de situação

No caso dos dois elementos cilíndricos com os eixos enviesados (situação relativa mais geral), a sua situação relativa pode ser parametrizada através de dois parâmetros (características de situação): a distância entre os eixos enviesados (comprimento da perpendicular comum) e o ângulo entre os dois eixos (ângulo entre as projeções ortogonais dos eixos, num plano normal à sua perpendicular comum), ver figura 4.14 a).

No caso dos elementos cilíndricos com os eixos paralelos mas distintos, a sua situação relativa pode ser parametrizada através de 3 parâmetros (características de situação): a distância entre os eixos paralelos e dois ângulos nulos ( $0^\circ$ ) [entre os dois eixos, no plano por eles definido, e entre as suas projeções ortogonais, num plano perpendicular àquele (dois parâmetros implícitos)], ver figura 4.14 b).

No caso dos elementos cilíndricos com os eixos coaxiais (coincidentes), a sua situação relativa pode ser parametrizada através de 4 parâmetros (características de situação): as distâncias nulas (0 mm) e os ângulos nulos ( $0^\circ$ ) entre os dois eixos, segundo dois planos perpendiculares entre si, cuja reta de interseção é coincidente com os eixos coaxiais (quatro parâmetros implícitos), ver figura 4.14 c).

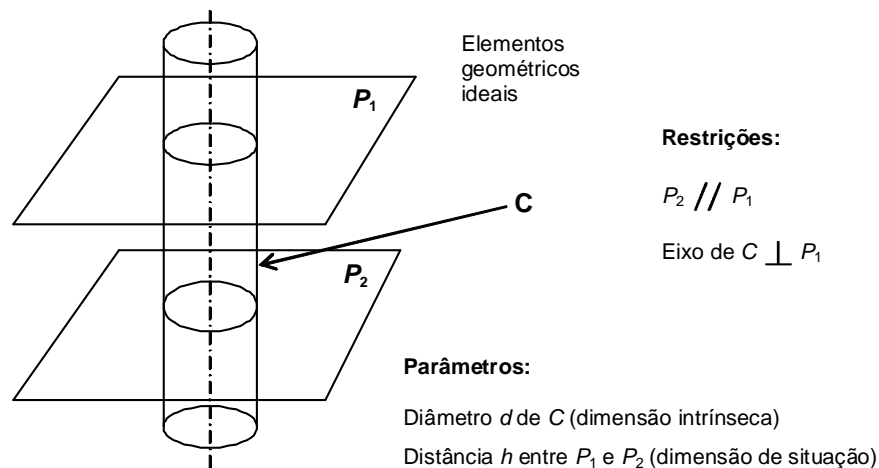


Geralmente, os parâmetros nominalmente nulos (implícitos) são considerados nas propriedades da geometria dos elementos. Na parametrização de modelos geométricos em CAD, os parâmetros implícitos podem ser introduzidos como **restrições geométricas** (p. ex. paralelismo e coaxialidade), ver [S6] e a norma ISO 10303-108.

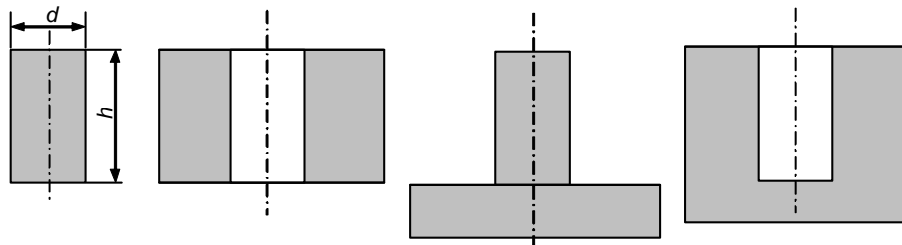
A norma ISO 25378 define, de um modo mais completo, a terminologia normalizada e os tipos gerais para as características geométricas das especificações.

#### 4.4.4.1 Exemplo de aplicação

Na figura 4.15, apresenta-se um exemplo de abordagem da “cotagem” de um sólido (um cilindro), com base em conceitos da teoria de “parametrização de modelos geométricos”, atrás descritos, extraído da referência [S6] e que difere da teoria clássica de cotagem nominal, exposta nos “manuais de desenho técnico correntes” [S6 e A3]. Esta teoria relaciona a cotagem com as restrições impostas entre elementos. O modelo nominal é constituído apenas por uma superfície cilíndrica  $C$  e por um par de planos paralelos  $P_1$  e  $P_2$  (os topos).



Elementos geométricos descritos, constituintes de diferentes modelos nominais:



As dimensões e as restrições deverão ser impostas numa representação nominal.

Figura 4.15 – Exemplo de abordagem da cotagem nominal. Adaptada de [S6]

A superfície cilíndrica  $C$  tem como característica intrínseca, o diâmetro  $d$ , e os planos  $P_1$  e  $P_2$  não têm qualquer característica intrínseca (ver quadro 4.8). Por outro lado, de acordo com o quadro 4.7, o par de planos paralelos  $P_1$  e  $P_2$  constitui um elemento composto também classificado na classe de invariância plana (3 graus de invariância) e o seu elemento de situação é também um plano.

A expressão (4.1) permite determinar o número de características de situação necessárias para a definição da situação relativa dos dois planos,  $NCS = 6 - (3+3-3) = 3$ , isto é, 1 parâmetro dimensional linear (distância  $h$  entre os planos) e 2 parâmetros dimensionais angulares (ângulos nulos entre os dois planos, medidos segundo dois planos perpendiculares a ambos e perpendiculares entre si – parâmetros implícitos), conforme especifica o quadro 4.10. Geralmente, o parâmetro dimensional linear é colocado no aspeto dimensão e os parâmetros angulares nominalmente nulos são considerados nas propriedades da geometria dos elementos. Na parametrização de modelos geométricos gerados em CAD, os parâmetros implícitos podem ser introduzidos como **restrições geométricas**.

As características (parâmetros) de situação entre os dois planos paralelos passam a ser as características intrínsecas do elemento resultante. Logo, o elemento de coleção dos dois planos paralelos tem três características: a distância  $h$  entre os planos e dois ângulos nulos (ou de  $180^\circ$ , por convenção), entre os dois planos, que definem o paralelismo (parâmetros implícitos).

## 4.5 Breves considerações sobre a importância dos elementos geométricos na nova linguagem GPS

Nas referências [S3 e A2], assinala-se que a classificação dos elementos geométricos de superfície, com base na definição de grupo de simetria, é idêntica à das ligações cinemáticas entre pares de elementos, com contacto superficial ("*lower order kinematic pairs*"), o que sugere o seu possível interesse para uma caracterização da funcionalidade e fabricação dos elementos geométricos. Adicionalmente, como estas ligações são muito usadas, na prática, em diferentes mecanismos, nomeadamente em máquinas-ferramenta, muitos processos de fabricação de elementos de superfície inserem-se numa cadeia deste tipo de ligações cinemáticas. Estes aspetos sugerem que os elementos de superfície podem ser adequadamente agrupados para fins de toleranciamento, de acordo com aquela classificação.

Por outro lado, a circunstância da situação relativa entre dois quaisquer elementos geométricos ser a mesma dos elementos de situação (ponto, linha reta e/ou plano), correspondentes às suas respetivas classes de invariância, é atualmente determinante no estabelecimento de referências especificadas ("*datums*"), necessárias para a definição da posição e/ou da orientação de zonas de tolerância (ver a norma ISO 5459) ou de condições virtuais (ver a norma ISO 2692), em termos de toleranciamento geométrico. Essas referências, estabelecidas a partir de superfícies integrais nominais, compreendem um ou mais elementos de situação dos elementos associados às superfícies reais ou extraídas (ver figuras 4.2 e 4.22).

Finalmente, os elementos de situação permitem também o estabelecimento de uma base racional para a parametrização da situação relativa entre elementos geométricos, por meio de características (intrínsecas e de situação) e de restrições geométricas, nomeadamente entre os elementos de referência e os elementos toleranciados.

## 4.6 Modelo para a especificação e verificação geométricas

### 4.6.1 Objetivo e campo de aplicação

A norma ISO 17450-1 propõe um modelo que foi concebido para permitir a expressão dos conceitos fundamentais da especificação geométrica no domínio GPS, através de uma abordagem global, e uma matematização desses conceitos que facilite a sua integração em sistemas informáticos.

O seu objetivo é o estabelecimento das bases de uma linguagem (e não diretamente a linguagem) de definição geométrica de produtos, utilizável em conceção (de conjuntos e peças individuais), fabricação e verificação (incluindo a descrição do procedimento de medição), independentemente do suporte de comunicação (papel de desenho, desenho numérico, ficheiro de intercâmbio).

Pretende-se também que possa servir como uma ferramenta de base no âmbito da revisão das atuais normas de cotação e toleranciamentos, que tem vindo a ser realizada de um modo sistemático e unificado.

### 4.6.2 O atual conceito de especificação geométrica

A **especificação geométrica** é a etapa da conceção em que se estabelece o campo dos desvios admissíveis de um conjunto de características de uma dada peça, que satisfazem o seu desempenho funcional requerido (necessidade funcional). Define, também, um nível de qualidade em adequação com os processos de fabricação, os limites admissíveis para a fabricação e a definição da conformidade da peça (ISO 17450-1).

Esta nova definição faz referência aos três domínios de atividade respeitantes a um produto em desenvolvimento, aquando da operação de especificação: a sua função, a sua fabricação e o seu controlo. Ao admitir que os processos de fabricação são conhecidos durante a especificação, a norma ISO 17450-1 parece ir no sentido de propor uma reorganização das diferentes operações necessárias à obtenção do produto, num quadro de “engenharia simultânea” [S2].

### 4.6.3 O contexto da especificação geométrica

A Especificação técnica de um produto (TPS) socorre-se de um conjunto de modelos da superfície real de cada uma das peças componentes – os **modelos da superfície** – para definir a totalidade do produto. Um modelo da superfície representa o conjunto de limites físicos da peça real ou virtual e permite a definição de elementos geométricos simples, compostos e porções de elementos.

A **especificação geométrica** interessa-se pois pela superfície da peça e insere-se numa cadeia de definições que vai desde a necessidade funcional até ao resultado da medição (ver figura 4.16).

<b>Necessidade</b>	—	<b>Especificação</b>	—	<b>Especificação</b>	—	<b>Grandeza</b>	—	<b>Resultado da</b>
<b>funcional</b>		<b>funcional</b>		<b>geométrica</b>		<b>(a medir)</b>		<b>medição</b>

Figura 4.16 – Relação entre as necessidades funcionais e a especificação geométrica (ISO 17450-1)

No estágio inicial da concepção, o **projetista** começa por estabelecer uma “peça” perfeita com forma e dimensões que se ajustam aos requisitos funcionais pretendidos para o mecanismo. Este modelo de “peça perfeita” (de geometria ideal), definido através da documentação técnica do produto (TPD) [A1], designa-se por **modelo da superfície nominal** [ver figura 4.17 a)].

Esta primeira etapa (**concepção nominal**) dá origem a uma representação da peça apenas com **valores nominais que são impossíveis de produzir ou inspecionar** (uma vez que cada processo de fabricação ou de medição tem a sua própria variabilidade ou incerteza). O modelo da superfície nominal é uma superfície contínua constituída por um número infinito de pontos, sendo ele próprio um elemento ideal composto. É neste modelo, em representações 2D ou 3D, que são inscritos os vários símbolos e indicações que contêm a informação sobre as características dos seus elementos geométricos constituintes – a **sintaxe da linguagem GPS**.

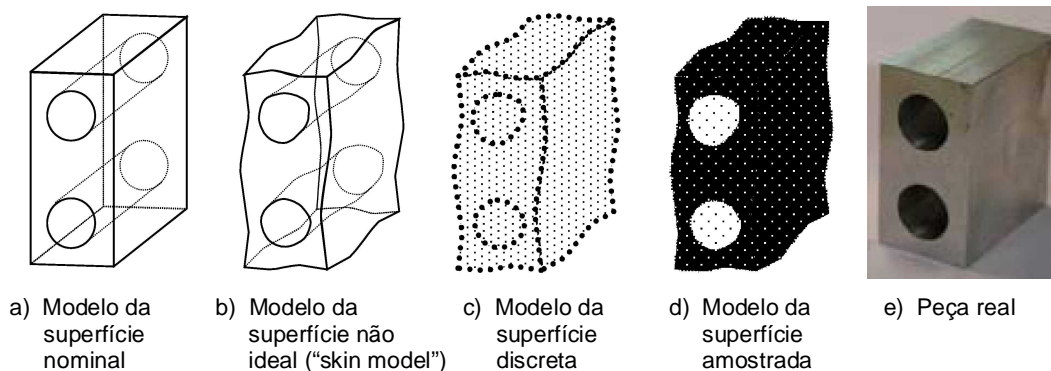


Figura 4.17 – Exemplo da superfície real de uma peça e seus modelos

Por outro lado, a **superfície real da peça** (ou pele da peça), que é a interface física da peça com o seu meio envolvente [ver figura 4.17 e)], é geometricamente imperfeita, sendo impossível ter uma perceção completa das suas variações dimensionais, de modo a compreender totalmente a extensão dessas variações.

Neste enquadramento, a norma ISO 17450-1 introduziu o conceito de **modelo da superfície não ideal** (ou “*skin model*” – modelo da pele), que é uma representação da interface física da peça, onde vão ser formalizados os conjuntos ordenados de **operações de especificação geométrica e de verificação**, que não podem ser executadas diretamente sobre a peça real [ver figura 4.17 b)].

Assim, a partir da geometria nominal, o projetista concebe um **modelo virtual da superfície real** que representa as variações que poderiam ser esperadas na superfície real da peça (**intenção da**

**conceção**). Este modelo é uma superfície contínua constituída por um número infinito de pontos que pode ser decomposta em elementos de forma imperfeita (elementos não ideais).

O modelo da superfície não ideal (“*skin model*”) é, pois, utilizado para simular variações da superfície a um nível conceptual, correspondendo à expressão da **semântica da linguagem GPS**. Neste modelo, o **projetista** deverá ser capaz de otimizar os valores limites máximos admissíveis, para os quais a função da peça se degrada, mas continua ainda a ser assegurada. Estes valores limites máximos admissíveis definem as tolerâncias de cada característica geométrica da peça. A ISO 17450-1 não inclui a metodologia para avaliar a proximidade da especificação geométrica em relação às especificações funcionais (**ambiguidade da descrição da função**, ver secção 4.8.1.1).

No entanto, por vezes, a formalização das operações de especificação geométrica e de verificação requer que seja tido em conta apenas um número finito de pontos. Nesse sentido, a partir do “*skin model*”, considera-se a extração do conjunto de pontos necessários, obtendo-se um **modelo da superfície discreta**, que é também ele próprio um elemento não ideal [ver figura 4.17 c)].

Na figura 4.18, pode observar-se uma aplicação simples deste conceito, para o caso da tolerância de inclinação de um elemento geométrico de uma peça, num exemplo retirado da norma ISO 1101 – “Toleranciamento geométrico”.

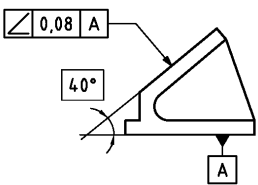
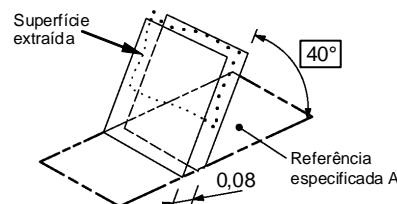
Indicação no desenho (sintaxe)	Interpretação (semântica)
 <p>Tolerância de inclinação de uma superfície em relação a uma superfície de referência</p>	 <p>A superfície extraída (real) deve estar compreendida entre dois planos paralelos distantes de 0,08 mm e inclinados de um ângulo teoricamente exacto de 40°, em relação ao plano de referência A.</p>

Figura 4.18 – Exemplo da sintaxe e da semântica de um toleranciamento geométrico de inclinação (ISO 1101)

A **verificação** é a etapa da fabricação em que um **metrologista** determina se a **superfície real de uma peça** está conforme com o campo de desvios admissíveis que foi especificado. Com a utilização de **metrologia digital computadorizada** [ver exemplos de máquinas de medição tridimensionais e bidimensionais, respetivamente nas figuras 4.19 a) e b)], o modelo da superfície discreta é aproximado através de uma amostragem de pontos da peça efetuada, por meio de uma extração física, com equipamento de medição, daí resultando o **modelo da superfície amostrada** [ver figura 4.17 d)], que é um elemento não ideal constituído por um número finito de pontos. No caso de uma verificação com instrumentos de **metrologia convencional** [p. ex. calibres, ver exemplos na figura 3.28 b)], trabalha-se diretamente com a própria **superfície real da peça** (ver norma ISO 22432). O registo dos desvios geométricos verificados deverá ser utilizado pelo **fabricante** para ajustar o processo de fabricação.



a) Máquina de medição de coordenadas (CMM); b) Máquina de medição de circularidades ("Roundness tester")

Figura 4.19 – Exemplos de equipamentos de metrologia digital computadorizada

O **metrologista** começa por ler a especificação, tendo em conta o "*skin model*" ou o "modelo da superfície discreta", para conhecer as características especificadas. Seguidamente, a partir da superfície real da peça, define as etapas individuais do plano de verificação, dependendo dos equipamentos de medição. A conformidade é então determinada através da comparação das características especificadas com o resultado da medição da peça.

**O modelo da superfície não ideal ("*skin model*") corresponde à formalização da etapa de especificação**, em que são estabelecidos princípios, requisitos e tolerâncias, e interessa aos três principais intervenientes na realização de um produto. A sua principal função é, talvez, a de fazer o projetista tomar consciência de que a realidade é complexa e não pode ser reduzida a uma geometria nominal [S2].

#### 4.6.4 Operações para elementos geométricos

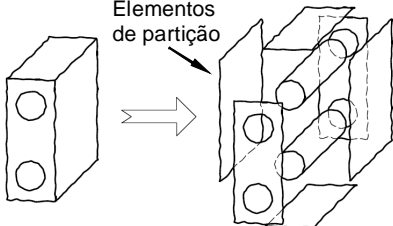
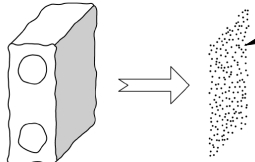
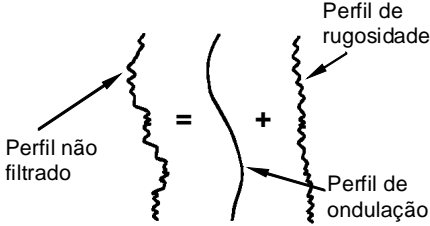
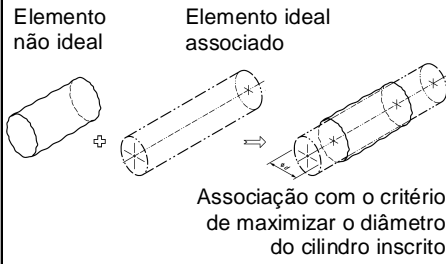
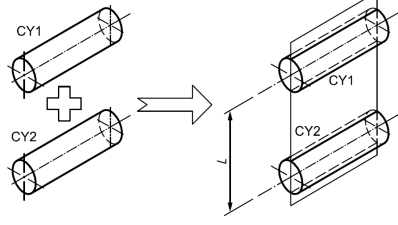
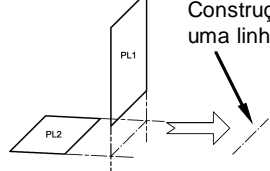
A nova linguagem GPS permite definir uma especificação geométrica como um conjunto ordenado de operações (designado de **operador**) que pode ser considerado como uma instrução virtual de medição, em que cada operação e os seus parâmetros definidores são passos do processo de medição [N1]. As **operações** são ferramentas específicas necessárias para a obtenção de elementos (ideais ou não ideais) ou de valores de características, o seu valor nominal e o(s) seu(s) limite(s).

A ideia de representar uma medição em termos de uma série de operações e de definir uma especificação como uma "prescrição" para uma medição foi expressa, pela primeira vez, pelo então ISO/TC 57 – "*Metrology and properties of surfaces*". No domínio dos estados de superfície, foi sempre habitual definir cada parâmetro de superfície em função do instrumento utilizado na sua medição e dos algoritmos e ajustes desse instrumento. Na antiga norma ISO 4287-2:1984, o termo "operador ideal" era utilizado para descrever o instrumento, o algoritmo, os ajustes e o procedimento de medição que forneceriam o valor correto, em conformidade com a definição do parâmetro do estado

de superfície. Logo, a atual definição de uma especificação geométrica como um conjunto ordenado de operações, preconizada na nova linguagem GPS, é apenas um desenvolvimento estruturado de uma prática tradicional no domínio dos estados de superfície [N1].

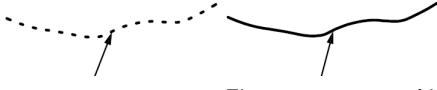
As operações consideradas, na norma ISO 17450-1, estão apresentadas, de um modo sucinto, no quadro 4.11, podendo ser utilizadas sem qualquer ordem específica.

Quadro 4.11 – Operações

<b>Operações para elementos</b>	
<p><b>Partição</b></p> <p>Operação utilizada para identificar uma porção de um elemento geométrico que pertence à superfície real da peça ou a um modelo de superfície da peça. Permite obter os elementos não ideais correspondentes aos elementos nominais ou apenas partes limitadas de ambos.</p>	 <p>Elementos de partição</p>
<p><b>Extração</b></p> <p>Operação utilizada para identificar pontos específicos, a partir de um elemento não ideal. Identifica um número finito de pontos em conformidade com critérios específicos.</p>	 <p>Pontos extraídos</p>
<p><b>Filtragem</b></p> <p>Operação utilizada para criar um elemento não ideal a partir de outro elemento não ideal ou para transformar uma curva de variação noutra, através da redução do nível de informação, realizada em conformidade com critérios específicos.</p>	 <p>Perfil não filtrado</p> <p>Perfil de rugosidade</p> <p>Perfil de ondulação</p>
<p><b>Associação</b></p> <p>Operação utilizada para ajustar elemento(s) ideal(ais) a elemento(s) não ideal(ais), em conformidade com critérios específicos. Os critérios de associação dão um objetivo para uma característica e podem fixar <b>restrições</b>. As restrições fixam o valor das características ou os limites da característica.</p>	 <p>Elemento não ideal</p> <p>Elemento ideal associado</p> <p>Associação com o critério de maximizar o diâmetro do cilindro inscrito</p>
<p><b>Coleção</b></p> <p>Operação utilizada para identificar mais do que um elemento geométrico que, em conjunto, desempenham um papel funcional. Uma característica de situação entre dois elementos transforma-se numa característica intrínseca do elemento composto.</p>	 <p>CY1</p> <p>CY2</p>
<p><b>Construção</b></p> <p>Operação utilizada para construir elemento(s) ideal(ais), a partir de outros elementos ideais. Esta operação deve respeitar as restrições.</p>	 <p>PL1</p> <p>PL2</p> <p>Construção de uma linha reta</p>

(Continua)

Quadro 4.11 – Operações (conclusão)

Operações para elementos	
<p><b>Reconstrução</b></p> <p>Operação utilizada para criar um elemento contínuo (fechado ou não) a partir de um elemento extraído (não contínuo). Possibilita definir a interseção entre um elemento extraído e um elemento ideal (ver ISO 14406).</p>	
<p><b>Avaliação</b></p> <p>Operação utilizada para identificar o valor de uma característica ou o seu valor nominal e o(s) seu(s) limite(s).</p>	<p>A avaliação é sempre utilizada após a(s) operação(ões) com elemento(s) que define(m) uma especificação ou uma verificação.</p>
<p><b>Transformação</b></p> <p>Operação utilizada para converter uma curva de variação noutra.</p>	<p>Quando uma característica de base é local, pode observar-se uma variação ao longo do elemento, que pode ser representada por uma curva. A curva de variação pode ser submetida a alguns tratamentos (transformações).</p>

Ao generalizar o conceito de **operações** aos domínios da conceção nominal, da especificação e da verificação, de acordo com esquema apresentado na figura 4.20, a nova linguagem GPS estabelece um sistema em que o procedimento de especificação é paralelo ao procedimento de verificação e onde cada operação simples, que pode influenciar o resultado da medição, deve ser expressa através de uma especificação por omissão (“*by default*”) ou de uma especificação detalhada especial [D1].

A linguagem GPS tem uma **sintaxe** (conjunto de símbolos e de regras de escrita) cuja representação gráfica é indicada numa vista do **modelo da superfície nominal** de uma peça, constituído por superfícies ideais. No entanto, a **semântica** (significado dos princípios, requisitos e tolerâncias) desta linguagem é baseada num **modelo geométrico abstracto** da peça, constituído por superfícies não ideais. Em 1983, Requicha [R1], citado na referência [S5], definiu a semântica da linguagem GPS como um “procedimento de inspeção teórico”, através do seguinte esquema:

“Um(a) (modelo de uma) peça  $P$  satisfaz uma especificação de tolerância  $T$  se, e só se, existir uma decomposição de  $\partial P$  (fronteira de  $P$ ) em subconjuntos  $En_i$ , chamados de elementos de superfície reais (elementos não ideais), tal que:

- $\cup En_i = \partial P$ .
- Existe uma correspondência biunívoca entre os elementos de superfície  $En_i$  e os elementos de superfície  $Ei_i$  (elementos ideais) do modelo da superfície nominal  $S$ .
- Cada elemento  $En_i$  satisfaz a proposição  $A_{ij}$  associada ao seu correspondente elemento  $Ei_i$ ”.

Assim, na etapa de **Conceção nominal**, o modelo da superfície nominal  $S$  [ver figura 4.17 a)] é decomposto em elementos nominais  $Ei_i$ , através de operações de partição, coleção e/ou construção, sendo cada um deles rotulado com um conjunto de símbolos gráficos e indicações (proposições  $A_{ij}$ ), que constitui a **sintaxe do toleranciamento**.



Por sua vez, a **semântica do toleranciamento** (o significado da simbologia e das indicações inscritas) é apresentada sob a denominação de **Intenção da concepção** (procedimento de especificação). Os detalhes sobre a forma como são definidos os elementos de forma imperfeita (elementos não ideais) são agrupados num **operador de especificação**, que reside apenas na **mente do projetista**. O procedimento de medição deverá imitar, tanto quanto possível, o procedimento de especificação, de modo a preservar a integridade da intenção da concepção.

Finalmente, uma análise dos procedimentos de medição reais, descritos sob a denominação de **Verificação de peças fabricadas para conformidade com a intenção da concepção**, permite perceber que os metrologistas utilizam várias operações para elementos, indicadas no **operador de verificação**. As operações para elementos, no operador de especificação, refletem, simplesmente, as do operador de verificação.

Esta relação biunívoca proporciona as bases técnicas para uma visão integrada da especificação e verificação geométricas de produtos [S5, D1].

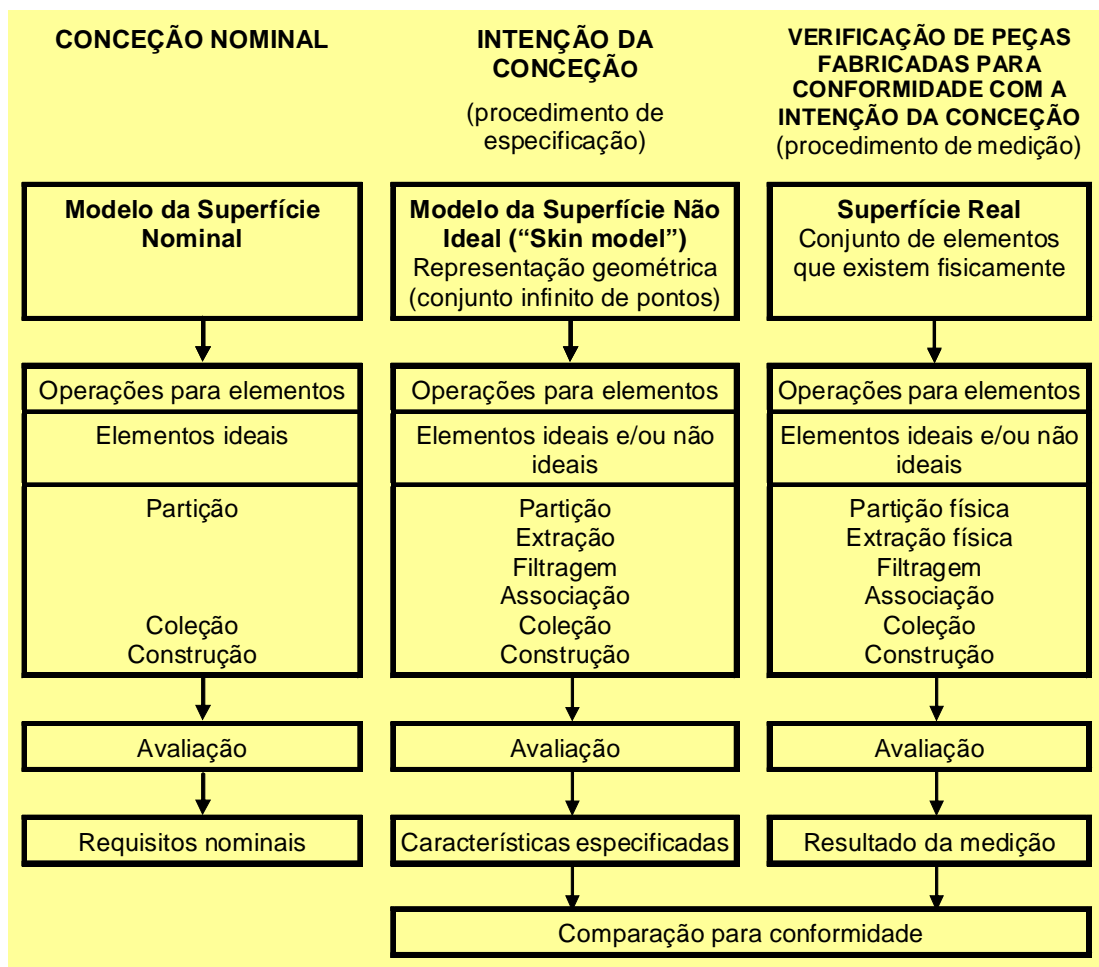


Figura 4.20 – Comparação entre concepção nominal, procedimentos de especificação e de medição

Os conjuntos de operações duais para elementos, indicados na figura 4.20, merecem alguns comentários, já que aquelas operações são mais familiares aos metrologistas. Um projetista responsável pela sua intenção de concepção, geralmente, não pensa ou documenta, explicitamente, os detalhes incorporados no operador de especificação.

Antes de mais, deve ser tido em conta que a generalidade dos conceitos expressos nos novos documentos normativos GPS assenta, por omissão, numa **metrologia digital computadorizada**, que é, cada vez mais, **o meio de referência** utilizado, na indústria, para a verificação dimensional e geométrica de produtos (ver figura 4.19).

Na perspetiva da **verificação**, o metrologista observa a superfície de uma peça fabricada, ou seja, um objeto físico, o que se enquadra na denominação de **Superfície real**, indicada na figura 4.20. Essa superfície é constituída por um **número infinito de pontos** que separam a peça do seu meio envolvente. Como não é possível formular uma representação matemática daquele conjunto de pontos, torna-se necessário dispor de alguma informação complementar, para poder caracterizar a resolução com que a superfície real está a ser observada [S5].

No mundo da verificação, as operações matemáticas podem ser distinguidas das operações físicas. As operações físicas baseiam-se em procedimentos físicos e são, geralmente, classificadas em mecânicas (p. ex. medição por apalpador mecânico), ópticas ou eletromagnéticas (p. ex. interferometria por varrimento de coerência, instrumentação de apalpação ótica e microscopia confocal por varrimento laser), ver ISO 14406 e [B2]. As operações matemáticas são tratamentos matemáticos da amostragem da peça, que são, geralmente, efetuados por meio de cálculo numérico ou por tratamento eletrónico (ver ISO 22432).

As várias operações para elementos, inscritas no **operador de verificação** esquematizado na figura 4.20, não estão sujeitas a qualquer sequência implícita. Assim, em termos do **procedimento de medição**, a superfície real de uma peça começa por ser **partida** em elementos integrais reais, constituídos por uma infinidade de pontos. No entanto, durante a inspeção real, esses elementos são aproximados através de uma amostragem composta por um número finito de pontos, dando origem aos elementos integrais extraídos (ver figura 4.2). Por si só, essa amostragem é insuficiente para assegurar a **extração** (ver ISO 14406) de um elemento, devendo ser acompanhada pela remoção (**filtragem**) do ruído e de detalhes desnecessários existentes na informação da medição (ver normas da série ISO 16610). Seguidamente, através de uma operação de **associação**, ajustam-se superfícies ideais à informação extraída e filtrada. Por vezes, os elementos geométricos são agrupados através de operações de **coleção** ou sujeitos a uma operação de **construção** (ver quadro 4.11).

Do ponto de vista da **especificação**, deve ser registado que o projetista não pode ser um mero espectador face às decisões, tomadas pelo metrologista, sobre as operações atrás referidas, uma vez que aquelas podem ter influência na funcionalidade final da peça.

O **princípio de dualidade**, postulado pelo Comitê técnico ISO/TC 213, é a solução proposta para este problema (ver ISO 8015). Segundo este princípio, o **operador de especificação** e o **operador de verificação** são duais e biunívocos – um imaginado pelo projetista e o outro posto em prática pelo metrologista. A definição explícita das operações para elementos poderá reduzir a probabilidade do projetista ser confrontado com produtos que não respeitam os requisitos funcionais, em resultado das operações realizadas pelo metrologista [S5].

Neste âmbito, e a título de exemplo, pode referir-se o projeto de norma ISO/DIS 1101.2:2015, que irá estabelecer o modo de indicação de **operadores de especificação especiais** para as tolerâncias geométricas de forma, de orientação, de posição e de batimento, com vista a reduzir a ambiguidade da sua especificação (ou incerteza de especificação), ver exemplos na figura 4.21.

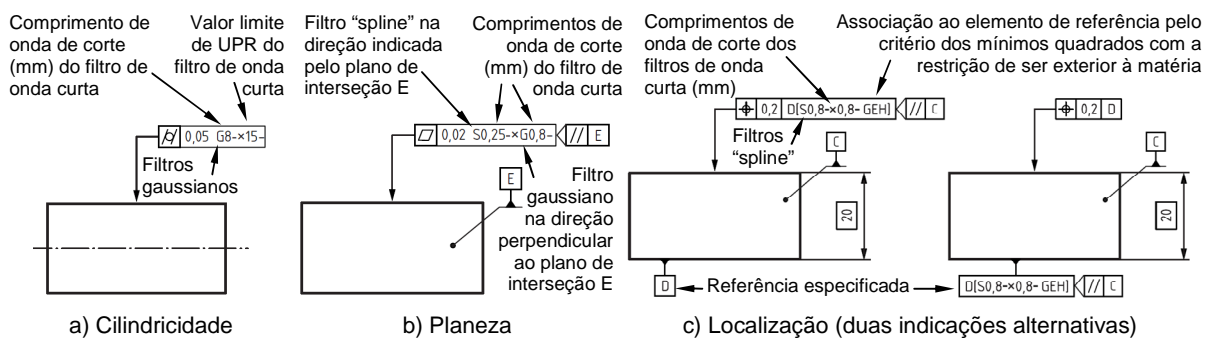


Figura 4.21 – Exemplos de indicações especiais de tolerâncias geométricas de forma e posição (ISO/DIS 1101.2:2015)

No entanto, o **princípio da dualidade não deve violar a respeitada independência do princípio de verificação**, que estipula que o projetista deve especificar, apenas, aquilo que é requerido para uma peça e não o respetivo modo de verificação.

Analisando, agora, o operador de especificação, pode começar-se por afirmar que as operações de **partição**, **coleção** e **construção** são claramente necessárias neste operador. Por sua vez, a **associação** é uma operação de ajustamento geométrico que pode ser definida, matematicamente, como um problema de otimização com restrições, sendo necessária para definir, por exemplo, referências especificadas e tolerâncias de localização. Finalmente, as operações de **extração** e de **filtragem** são necessárias na preparação de dados para os algoritmos de otimização [S5].

As operações de associação, extração e filtragem poderão ser dispensadas, se for considerada uma operação física no operador de verificação (p. ex. a utilização de um plano de medição para estabelecer uma referência especificada plana), em vez de uma operação de definição da "referência especificada", estabelecida no operador de especificação. Neste caso, o dispositivo físico tornar-se-ia a definição primária de um processo de verificação. No entanto, o ISO/TC 213 tomou a decisão de desenvolver a nova linguagem GPS baseada em princípios matemáticos, por oposição às anteriores

definições assentes em exemplos práticos, de modo que as funções do produto possam ser simuladas através de modelos físicos e matemáticos.

Na figura 4.22, descreve-se a aplicação de uma sequência de operações para elementos geométricos, na definição de uma referência especificada utilizada em toleranciamento geométrico, num exemplo retirado da norma ISO 5459.

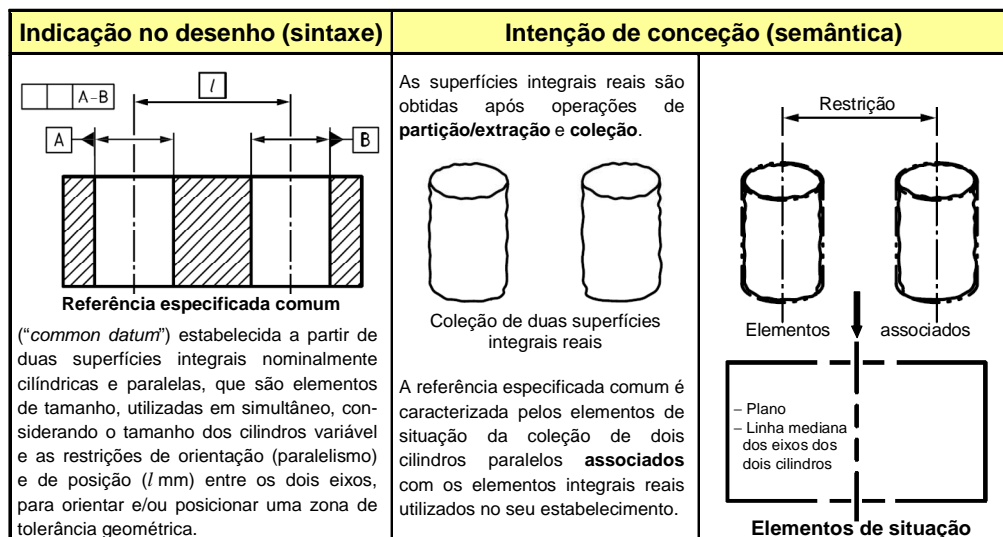


Figura 4.22 – Exemplo de definição de uma referência especificada comum a partir de uma sequência de operações (ISO 5459)

A filosofia de base do Comité técnico ISO/TC 213 preconiza apenas a normalização dos operadores de especificação. Os operadores de verificação deverão implementar as operações para elementos, normalizadas nos operadores de especificação, com uma contabilização cuidada da quantidade de incerteza, em cada passo da implementação.

Em síntese, as características geométricas são expressas em elementos que são retirados dos modelos ou da peça real, com a ajuda de **operações**. O interesse da ISO 17450-1 reside muito na formalização das operações e na necessidade, que daí decorre, de fornecer a sua respetiva sequência. O valor da característica toleranciada ou verificada é, deste modo, plenamente definido e não necessita de mais nenhuma interpretação [S2].

## 4.7 Métodos de especificação geométrica

O ISO/TC 213 está a utilizar os conceitos e as ferramentas apresentados neste texto como uma base para a revisão das atuais normas de cotagem e toleranciamento (ver os exemplos das figuras 4.18, 4.21 e 4.22) e para o desenvolvimento de uma nova geração de normas GPS que possa vir a assegurar uma melhor integração desta linguagem em sistemas 3D de CAD/CAM/CAQ ("Computer aided design / Computer aided manufacturing / Computer aided quality").

A nova linguagem GPS é pois uma evolução necessária da cotagem e do toleranciamento tradicionais e não uma revolução [B3]. Uma especificação consiste em expressar o campo dos desvios admissíveis de uma característica de uma peça em termos de limites admissíveis. Neste contexto, a ISO 17450-1 estabelece dois métodos de especificação geométrica:

#### 4.7.1 Especificação por zona de tolerância

Este modo de especificação corresponde ao toleranciamento geométrico, atualmente utilizado no desenho técnico, (ver exemplos nas figuras 4.18 e 4.21). Uma **especificação por zona de tolerância** limita o desvio admissível (toleranciado) de um elemento não ideal, no interior de um espaço (ver figuras 4.18 e 4.23). Este espaço é (um volume ou uma superfície) limitado por (um) elemento(s) ideal(ais) e pode, assim, ser caracterizado por:

- **característica intrínseca** do(s) elemento(s) ideal(ais), por exemplo, o diâmetro de um cilindro, a distância entre dois planos, ou o diâmetro de um conjunto de cilindros idênticos, e
- **elementos de situação** dos elemento(s) ideal(ais), por exemplo, o eixo de um cilindro, o plano de simetria de dois planos, o eixo e o plano de um conjunto de cilindros paralelos.

Uma **especificação por zona de tolerância** pode também ser definida como o valor admissível da **característica de situação** entre um elemento não ideal (elemento de partição, por exemplo) e um elemento ideal (elementos de situação da zona).

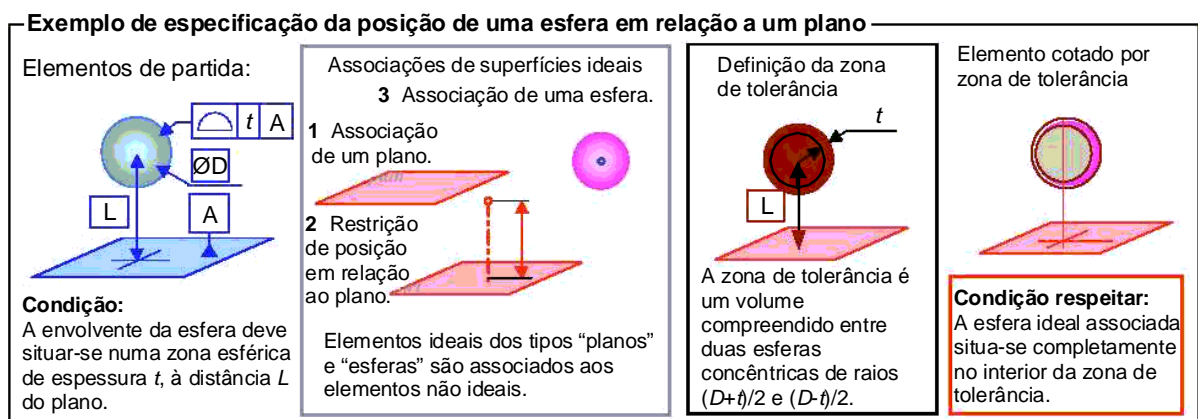


Figura 4.23 – Exemplo de especificação por zona de tolerância. Adaptada de [C1]

No caso de especificação por zona de tolerância, o **desvio** é o valor mínimo possível da característica intrínseca do elemento ideal que limita a zona que contém o elemento não ideal. Neste caso, o desvio pode também ser definido como o valor da máxima distância de cada ponto de um elemento não ideal ao elemento ideal (p. ex. o elemento de situação da zona).

### 4.7.2 Especificação por dimensão

Uma **especificação por dimensão** (ou especificação de características geométricas [S2]) limita o valor admissível (toleranciado) de uma **característica intrínseca** (ver quadro 4.8) ou de uma **característica de situação** entre elementos ideais (elementos associados) (ver quadro 4.9). Por exemplo, uma especificação por dimensão pode limitar:

- o diâmetro  $\varnothing d$  de um cilindro associado a um elemento não ideal [ver figura 4.24 a)],
- a distância  $L$  entre dois planos paralelos associados a dois elementos não ideais [ver figura 24 b)].

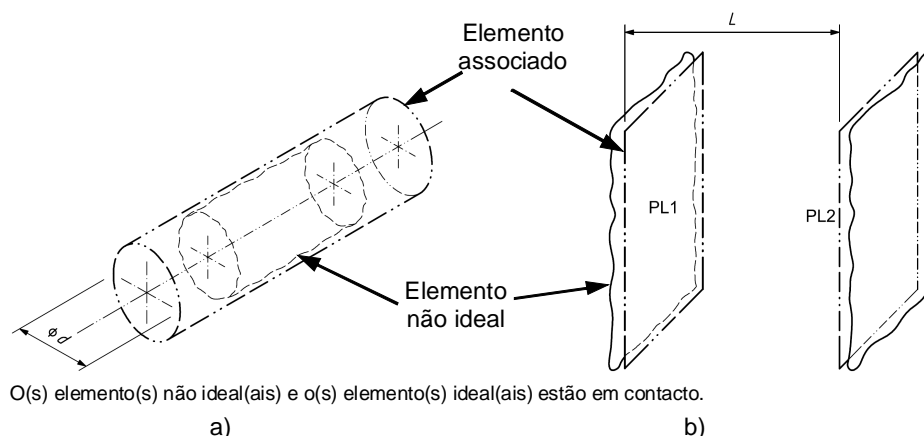


Figura 4.24 – Especificações por dimensão (ISO 17450-1)

Este modo de especificação, introduzido na literatura pedagógica em 1997 [S1], reflete os métodos utilizados pelas máquinas de medição de coordenadas [T1] e integra a nova linguagem GPS baseada nas operações para elementos, permitindo, assim, **fixar os limites de uma grandeza do tipo comprimento ou ângulo de um elemento ideal ou entre elementos ideais (elementos associados)** [C1, B2].

No exemplo da figura 4.25, a grandeza indicada depende, pois, das **regras de associação prescritas** para definir os elementos ideais (elementos associados) do tipo plano e esfera.

#### Exemplo de especificação da posição do centro de uma esfera em relação a um plano

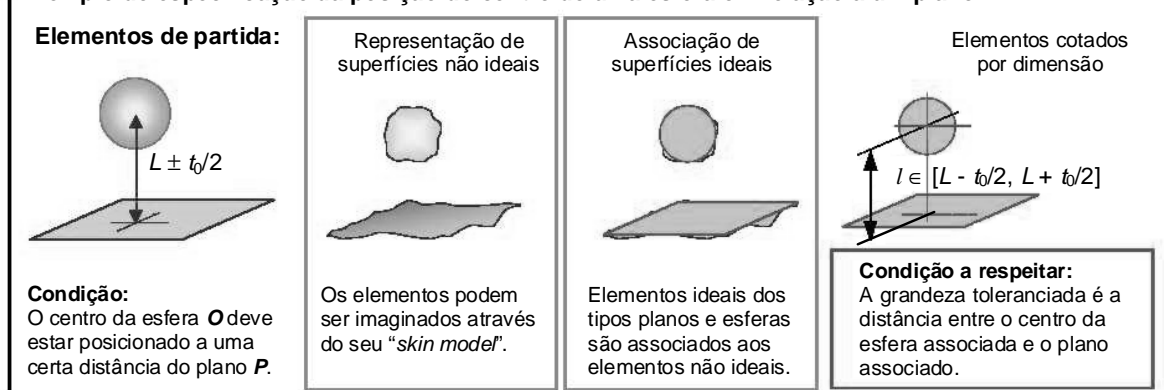


Figura 4.25 – Exemplo de uma especificação por dimensão. Adaptada de [C1]

No caso de especificação por dimensão, o **desvio** é:

- a diferença entre o valor da característica intrínseca do elemento associado e o valor da característica intrínseca do correspondente elemento nominal, ou
- a diferença entre o valor da característica de situação entre dois elementos associados e o valor da característica de situação entre os dois elementos nominais correspondentes.

A especificação por dimensão engloba, também, o conceito de “*Vectorial Dimensioning and Tolerancing*” (VD&T), proposto por A. Wirtz, em 1991 [H2], que segue as regras de funcionamento das CMM (“*Coordinate Measuring Machines*”) e dos sistemas CAD/CAM [H3]. Além disso, o VD&T proporciona uma relação direta entre a medição e o controlo do processo de fabricação. As referências [H3 e H1] consideram que o VD&T é o método mais apropriado para estabelecer uma ligação conjunta entre a conceção, a fabricação e a verificação. No exemplo da figura 4.26, o cilindro nominal é definido pelo vetor de posição nominal  $P$ , pelo vetor de orientação nominal  $E$  e pelo tamanho nominal  $r$ . O cilindro substituto (associado) calculado a partir do cilindro real (superfície) é descrito, respetivamente, pelo vetor de posição real  $P_a$ , pelo vetor de orientação real unitário  $E_a$  e pelo tamanho real  $r_a$ .

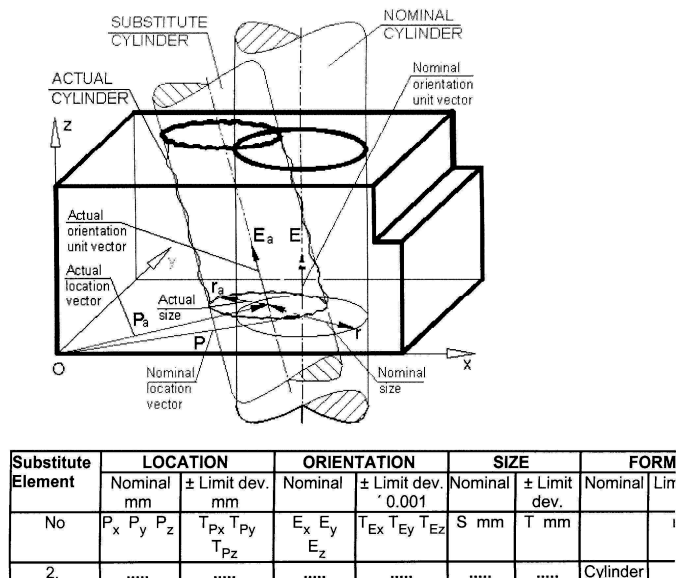


Figura 4.26 – Exemplo de conceito de “*Vectorial Dimensioning and Tolerancing*” (VD&T). Adaptada de [H3]

### 4.7.3 Comparação entre os dois métodos de especificação

A figura 4.27 ilustra as diferenças de significado entre os dois métodos de especificação, apresentados nas figuras 4.23 e 4.25. Mostra que, para um mesmo estado, uma restrição pode ser considerada como respeitada ou não, e que as posições reais das superfícies especificadas podem ser diferentes no espaço, levando a comportamentos funcionais que podem ser diversos.

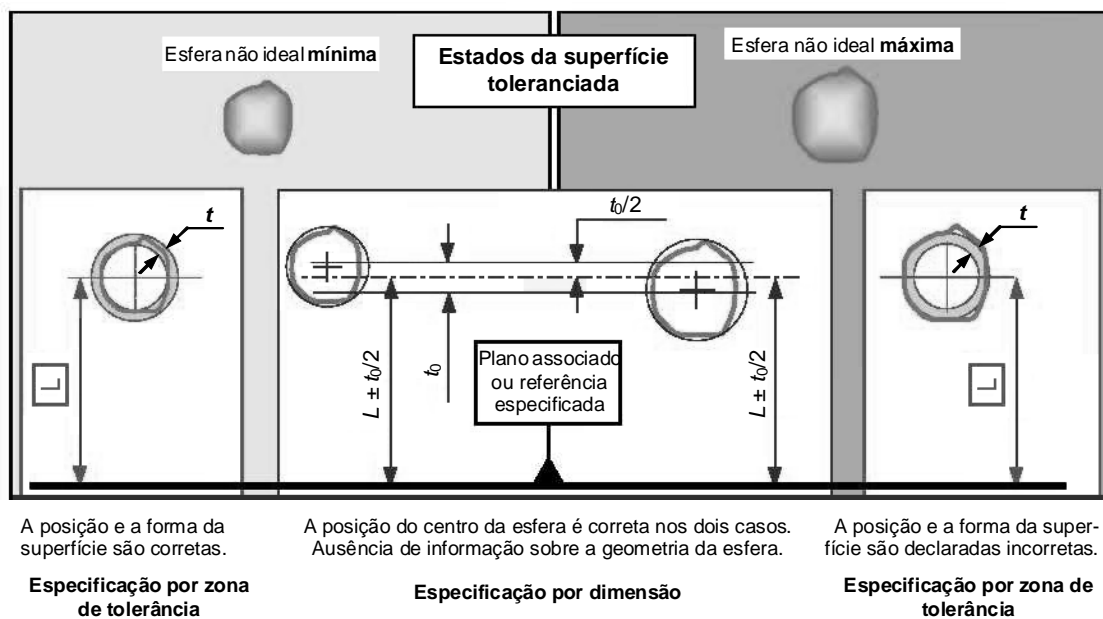


Figura 4.27 – Exemplo de comparação dos dois métodos de especificação. Adaptada de [C1]

Neste exemplo, a **especificação por zona de tolerância** integra as “componentes” das variações de posição, de orientação e também de forma do elemento especificado. Em termos de **critérios de utilização**, favorece a expressão de uma condição funcional associada à superfície da esfera (controla os problemas ligados ao contacto da **superfície esférica** e à posição do **centro real** da esfera).

Por sua vez, a **especificação por dimensão** permite isolar cada componente da cotação, podendo assim fazer-se o controlo das dispersões de posição (distâncias entre pontos), de orientação (ângulos) e também de forma. Em termos de **critérios de utilização**, favorece a expressão de uma condição funcional associada à posição do centro de uma esfera teórica (controla os problemas ligados à posição de uma ligação esférica, independente da superfície real esférica). Este tipo de especificação é mais restritiva do que aquela que utiliza a noção de zona de tolerância.

Torna-se, pois, essencial exprimir claramente a condição funcional a respeitar, antes de escolher um método de especificação que a traduza o melhor possível. O exemplo da figura 4.27 mostra as diferenças entre esses dois tipos de cotação e o facto de eles não exprimirem as mesmas necessidades [C1].

## 4.8 Princípios de base do conceito GPS

Com o desenvolvimento da nova visão integrada da especificação e da verificação geométricas, constatou-se que **a noção de incerteza**, atualmente bem enraizada no domínio da metrologia, **deveria ser generalizada a todos os elos da cadeia que assegura a passagem da necessidade**



**funcional à mensuranda**, o que permite relativizar a importância das incertezas de implementação resultantes do meio de medição [S5].

A norma ISO 17450-2 expressa os fundamentos da filosofia GPS, que estão na gênese das normas elaboradas pelo ISO/TC 213, através dos seguintes quatro princípios de base:

- A: É possível controlar, de modo significativo, a função de uma peça/elemento utilizando uma ou mais especificações GPS, inscritas na documentação técnica do produto. A correlação entre a função da peça/elemento e a(s) especificação(ões) utilizada(s) pode ser mais ou menos boa. Por outras palavras, a **ambiguidade da descrição da função** (ou incerteza de correlação) pode ser pequena ou grande.
- B: Uma especificação GPS para uma característica GPS deve estar inscrita na documentação técnica do produto. A peça/elemento deve ser considerada(o) aceitável/bom quando a especificação for satisfeita. **Apenas aquilo que é explicitamente requerido na documentação técnica do produto deve ser tido em conta.** A especificação GPS real, inscrita na documentação técnica do produto, define a mensuranda. Esta especificação pode ser perfeita/completa ou imperfeita/incompleta. Por outras palavras, a **ambiguidade de especificação** (ou incerteza de especificação) pode situar-se entre zero e um valor muito grande.
- C: A realização de uma especificação GPS é independente da especificação GPS. Uma especificação GPS é realizada através de um operador de verificação. A especificação GPS não prescreve quais os operadores de verificação que são aceitáveis. A aceitabilidade de um operador de verificação é avaliada a partir da **incerteza de medição** e, em certos casos, da **ambiguidade de especificação**.
- D: As regras e definições GPS normalizadas para a verificação definem meios teoricamente perfeitos para determinar a conformidade ou a não conformidade de uma peça/elemento com uma especificação GPS. No entanto, a verificação é sempre executada de modo imperfeito. A verificação inclui sempre uma **incerteza de implementação**, uma vez que envolve a realização da especificação GPS, por meio de equipamento de medição real, pelo que nunca pode ser perfeita.

#### 4.8.1 O impacte da incerteza nos princípios de base

Nos processos de desenvolvimento de produtos, a grande questão que se coloca é a de saber se as peças fabricadas, quando montadas, irão desempenhar a função pretendida. Neste âmbito, o ISO/TC 213 postula o seguinte **princípio de incerteza generalizada**: existirá sempre alguma incerteza sobre se o produto acabado irá desempenhar a função pretendida. **A incerteza é pois, apenas, uma expressão para a “falta de informação”** [D1, S5].

A **incerteza** é um parâmetro, associado a um valor indicado ou a uma relação, que caracteriza a dispersão dos valores que lhes poderão ser razoavelmente atribuídos (ISO 17450-2). No domínio GPS, um **valor indicado** poderá ser um resultado de uma medição ou um limite de especificação; uma **relação** é, normalmente, a diferença entre os valores fornecidos por dois operadores diferentes (p. ex. um operador de especificação e um operador de verificação real), para um mesmo elemento.

**A incerteza é uma ferramenta poderosa para comunicar as magnitudes do “risco” de uma decisão baseada nos resultados da verificação, mas só deve ser despendido tempo na sua determinação se isso for importante para a função da peça e se for vantajoso em termos de custo-benefício para a empresa [D1].**

A **incerteza total** é a soma (em termos do GUM) das ambiguidades da descrição da função e da especificação e da incerteza de medição (ver figura 4.28). A magnitude da incerteza total indica o nível de divergência entre o operador de verificação real e o operador funcional (conjunto de operações com uma correlação perfeita com a função pretendida para a peça/elemento). A incerteza total descreve a capacidade de determinar o desempenho funcional baseado na medição, não sendo previsível nem facilmente quantificável. **A incerteza total, a ambiguidade da descrição da função e a ambiguidade de especificação não são previsíveis nem quantificáveis.**

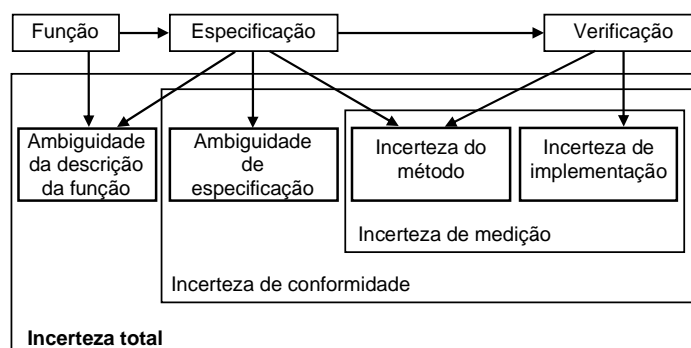


Figura 4.28 – Relações entre as várias incertezas. Adaptada de [W1]

Assim, por exemplo, se o **operador funcional** para um veio for expresso através da capacidade deste para rodar num furo obturado com um retentor, durante 2 000 h, sem dar origem a fugas de lubrificante, e o **operador de especificação** for definido por meio de um diâmetro Ø30 h7 para o veio e uma rugosidade de Ra 1,5 para o seu estado de superfície, com um valor de corte (“cut-off”) de 2,5 mm para o filtro de onda-longa, então a **incerteza total** é derivada da capacidade de determinar, por exemplo, com base em medições com um micrómetro de exteriores e um rugosímetro:

- se um veio medido, que se verifica estar em conformidade com a especificação, trabalhará durante 2 000 h sem dar origem a fugas, e
- se um veio medido, que se verifica não estar em conformidade com a especificação, não trabalhará durante 2 000 h sem dar origem a fugas de lubrificante.

A figura 4.29 traduz a conformidade da peça medida com o requisito funcional pretendido.

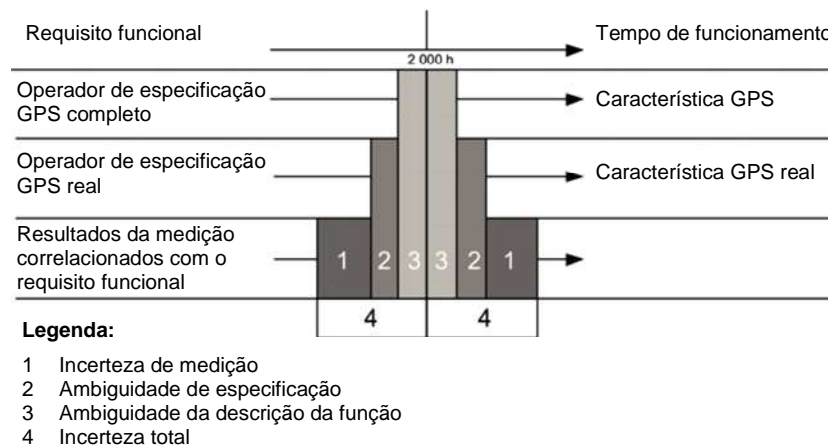


Figura 4.29 – Conformidade da peça com o requisito funcional pretendido (ISO 17450-2)

Por sua vez, a **incerteza de conformidade** é a soma (em termos do GUM) da ambiguidade de especificação e da incerteza de medição (ISO 17450-2). Relativamente à **incerteza de medição**, esta é igual à soma da incerteza do método e da incerteza de implementação (ver figura 4.28). A incerteza de conformidade quantifica a incerteza com que se pode comprovar que uma peça está conforme com todas as interpretações possíveis de uma dada especificação.

Assim, por exemplo, se a especificação de uma esfera for expressa apenas através da indicação  $S\varnothing 30 \pm 0,1$ , está-se em presença de um operador de especificação incompleto, uma vez que poderão ser utilizados diferentes critérios de associação (atendendo a que, atualmente, não há qualquer definição, por omissão, especificada nas normas ISO). A ambiguidade de especificação é derivada do intervalo de valores que podem ser obtidos quando são aplicados, à informação extraída da peça real, diferentes critérios de associação (p. ex. a esfera circunscrita mínima, o diâmetro mínimo entre dois pontos ou a esfera dos mínimos quadrados), porque a especificação não prescreve qual o critério de associação a utilizar.

Para se obter um operador de especificação completo como base para o operador de verificação perfeito, deve escolher-se um critério de associação particular, assim como outros componentes em falta no operador de especificação completo. Se, por exemplo, for escolhido um critério de associação em dois pontos, como parte do operador de especificação completo, então este critério de associação fará também parte do operador de verificação perfeito. Se for utilizado um micrómetro de exteriores para fazer a verificação da especificação, não há praticamente qualquer incerteza do método. No entanto, haverá uma incerteza de implementação que é derivada das imperfeições nas características metrológicas do micrómetro, por exemplo, erros no fuso de medição, desvios de planeza e de paralelismo nos contactos de medição, etc.

Neste exemplo, a incerteza de medição é composta apenas pela incerteza de implementação. Logo, a incerteza da conformidade engloba a incerteza de especificação e a incerteza de implementação.

#### 4.8.1.1 O impacto das ambiguidades de descrição da função e de especificação

Uma **especificação GPS** está completa quando todas as funções pretendidas para a peça /elemento são descritas e controladas com **características GPS**. Na maioria dos casos, a especificação GPS será incompleta porque algumas funções são descritas/controladas de modo imperfeito ou não o são de todo. Portanto, poderá haver uma boa ou má ligação entre a função da peça/elemento e a(s) especificação(ões) utilizada(s).

- a) A **ambiguidade da descrição da função** (anteriormente designada por incerteza de correlação) é a incerteza resultante da transformação da função pretendida para a peça em especificação geométrica indicada na documentação técnica do produto. Por exemplo, a transformação de uma condição de vedação necessária num sistema (rotação de um veio durante 2 000 h, sem dar origem a fugas, ver figura 4.30), em especificações dimensionais e geométricas num veio componente. Este tipo de incerteza refere-se ao caso de controlo imperfeito da função.

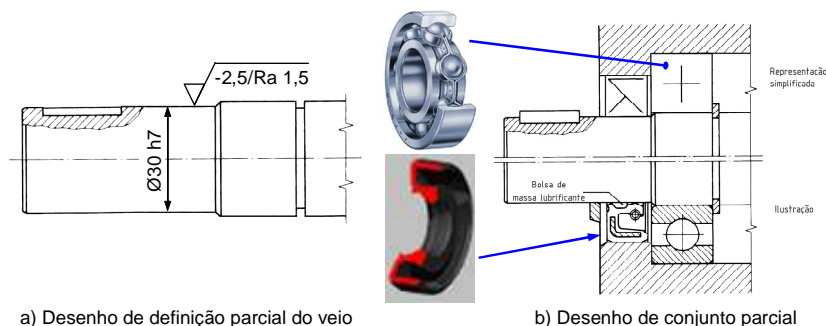


Figura 4.30 – Exemplo de especificação que pode dar origem a uma ambiguidade da descrição da função

- b) A **ambiguidade da especificação** (anteriormente designada por incerteza de especificação) é a incerteza que pode resultar da ambiguidade das especificações (imperfeitas/incompletas). Este tipo de incerteza implica a ausência de controlo completo da função (por exemplo, não especificando qual a superfície que deve ser utilizada como referência, ver figura 4.31).

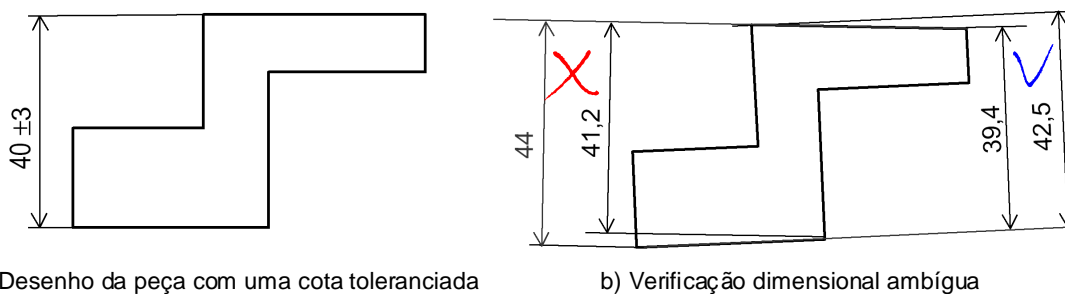


Figura 4.31 – Exemplo de especificação que comporta uma ambiguidade de especificação

Por exemplo, uma especificação GPS com ambiguidades pequenas da descrição da função e de especificação deverá descrever e controlar completamente as características geométricas que

controlam rigorosamente a função pretendida. O quadro 4.12 sumaria as combinações que podem resultar destas duas ambiguidades.

Quadro 4.12 – Combinação das ambiguidades de descrição da função e de especificação (ISO 17450-2)

	Ambiguidade de especificação pequena	Ambiguidade de especificação grande
Ambiguidade da descrição da função pequena	Descreve e controla características geométricas que controlam rigorosamente a função pretendida.	Descrevem-se e controlam-se características geométricas para realizar partes da função, mas a especificação está incompleta.
Ambiguidade da descrição da função grande	Descreve todas as características geométricas mas não controla rigorosamente a função pretendida.	Não descreve nem controla características geométricas requeridas para a função pretendida.

#### 4.8.1.2 O impacto das incertezas do método e de implementação

Adicionalmente, a **incerteza de medição**, que consiste nas incertezas do método e de implementação, resulta de cada implementação prática (e imperfeita) de um método de verificação GPS. Quando o procedimento implementado imita muito fielmente a definição teoricamente exata, existe uma incerteza de medição pequena. Uma medição de incerteza pequena é de pouca valia, quando a ambiguidade da descrição da função ou a ambiguidade de especificação é grande.

- a) A **incerteza do método** resulta, nomeadamente, da diferença que pode existir entre o que é especificado e o método que se utiliza para a sua verificação. Por exemplo, a maioria dos atuais programas informáticos das máquinas de medição de coordenadas (CMM) introduz incertezas na medição, derivadas dos métodos de medição nelas residentes (figura 4.32).

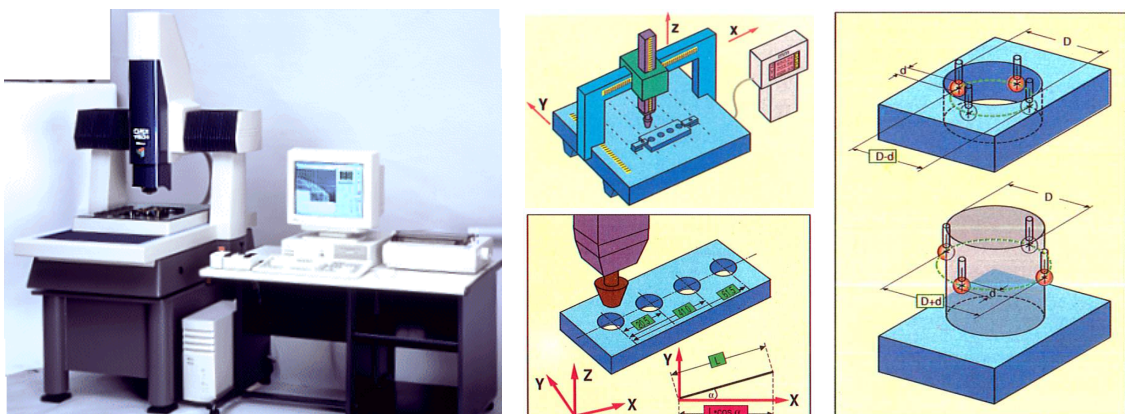


Figura 4.32 – Exemplo de equipamento CMM que pode introduzir uma incerteza do método

- b) A **incerteza de implementação** é resultante dos desvios físicos ligados às características metrológicas do instrumento de medição (a magnitude desta parte pode ser avaliada por calibração), ver figura 4.33, e às influências do meio ambiente.

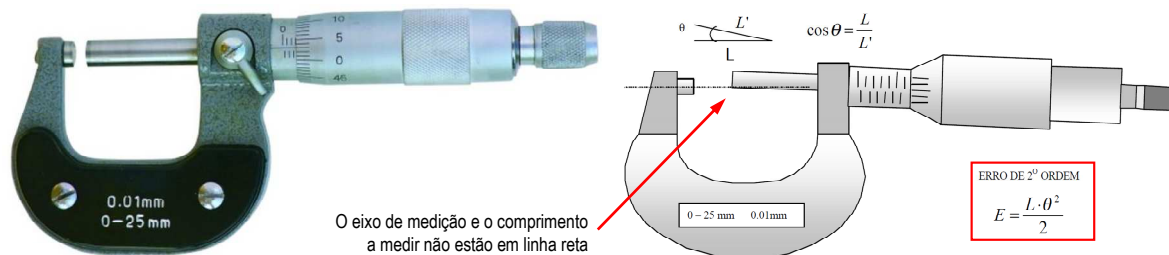


Figura 4.33 – Exemplo de instrumento que pode estar na origem de uma incerteza de implementação

O quadro 4.13 sumaria as combinações que podem resultar das incertezas do método e de implementação.

Quadro 4.13 – Combinação das incertezas do método e de implementação (ISO 17450-2)

	<b>Incerteza de implementação pequena</b>	<b>Incerteza de implementação grande</b>
<b>Incerteza do método pequena</b>	O processo de medição acompanha fielmente a especificação e está implementado com poucos desvios, em relação às características metrológicas ideais.	O processo de medição acompanha fielmente a especificação, mas está implementado com desvios significativos, em relação às características metrológicas ideais.
<b>Incerteza do método grande</b>	O processo de medição não acompanha muito rigorosamente a especificação, mas está implementado com poucos desvios, em relação às características metrológicas ideais.	O processo de medição não acompanha muito rigorosamente a especificação e está implementado com desvios significativos, em relação às características metrológicas ideais.

É impossível dizer, *a priori*, se será a combinação “incerteza do método grande e incerteza de implementação pequena” ou a combinação “incerteza do método pequena e incerteza de implementação grande” que dará origem a uma incerteza de medição geral maior. Uma combinação “incerteza do método pequena e incerteza de implementação grande” apresentar-se-á, geralmente, como tendo uma incerteza maior, já que a incerteza de implementação é tipicamente mais visível do que a incerteza do método.

## 4.9 Processo de especificação

O processo de especificação é o primeiro a ter lugar. O objetivo do processo de especificação é traduzir a **intenção de conceção** em requisito(s) para características GPS específicas. O processo de especificação é da responsabilidade do **projetista** e engloba, de acordo com a ISO 17450-2, os seguintes passos:

- 1) **Função da peça/ do elemento** – a desejada **intenção de conceção** da especificação GPS.
- 2) **Especificação GPS** – conjunto de **elementos de especificação GPS** que controla um **operador de especificação** (p. ex. U “X” 0,08-0,8 / Rz8max 3,3, na especificação de um estado de superfície). Uma especificação GPS não inclui, necessariamente, um conjunto

completo e suficiente de elementos de especificação GPS, podendo, ou não, ser expressa com, ou sem, modificadores de especificação (ver figuras 4.35 e 4.36).

- 3) **Elementos de especificação GPS** – símbolo(s) gráfico(s) normalizado(s) ou indicação(ões) relativo(s) a um conjunto ordenado de uma ou mais **operações de especificação** (p. ex., na especificação de um **estado de superfície**, estes elementos são a simbologia para os limites de tolerância, o tipo de filtro, a banda de transmissão, o perfil, o parâmetro, ..., a orientação das estrias). São utilizados na documentação técnica de produtos. Nem todas as características GPS têm uma lista completa e suficiente de elementos de especificação GPS, definidos nas normas existentes (ver figura 4.35).
- 4) **Operações de especificação** – operações formuladas utilizando expressões e/ou algoritmos matemáticos e/ou geométricos que definem parte da especificação. Estão organizadas em conjuntos ordenados de modo a formarem um **operador de especificação**. São utilizadas para especificar um requisito GPS para uma peça (produto ou componente), como parte de um operador de especificação. Uma operação de especificação é um **conceito teórico** (p. ex. a **associação** de um cilindro mínimo circunscrito, na especificação do diâmetro de um veio; a **filtragem** através de um filtro gaussiano, na especificação de um estado de superfície).
- 5) **Operador de especificação** – conjunto ordenado de operações de especificação que se correlaciona, até um certo ponto, com a função da peça/do elemento pretendida e define a mensuranda da especificação. Um operador de especificação destina-se a definir, por exemplo, um diâmetro específico de entre os possíveis num cilindro (p. ex. o diâmetro entre dois pontos, o diâmetro da circunferência mínima circunscrita, o diâmetro da circunferência máxima inscrita, o diâmetro da circunferência dos mínimos quadrados, etc.) e não o conceito genérico de “diâmetro”.

A figura 4.34 resume as possíveis regras aplicáveis às indicações GPS nos desenhos.

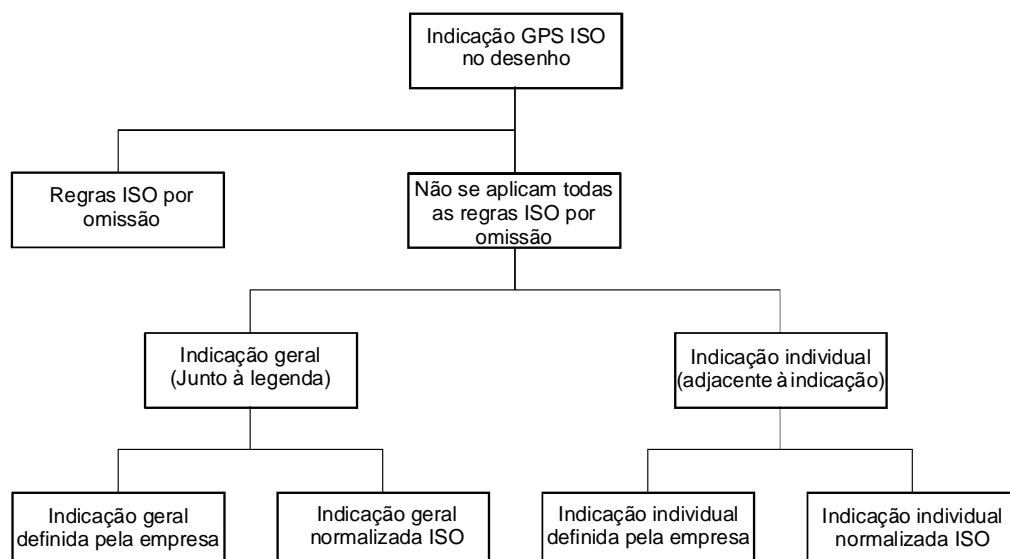


Figura 4.34 – Indicações GPS num desenho – possíveis regras aplicáveis (ISO 17450-2)

A figura 4.35 sistematiza os tipos de especificações completas e incompletas que podem ser indicadas num desenho e a figura 4.36 ilustra a relação entre os termos relativos às especificações.



Figura 4.35 – Indicações no desenho – tipos de especificações completas e incompletas (ISO 17450-2)

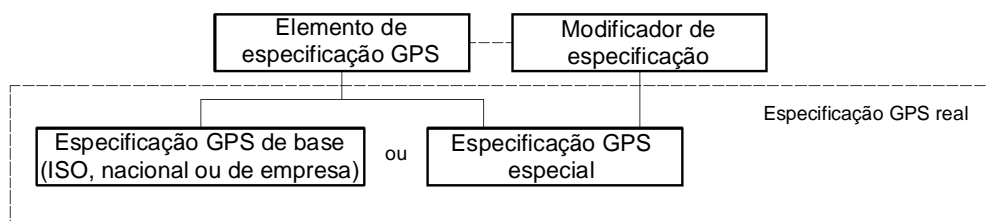


Figura 4.36 – Relações entre termos relativos às especificações GPS (ISO 17450-2)

## 4.10 Processo de verificação

O processo de verificação tem lugar após o processo de especificação. O objetivo deste processo é a verificação da característica da peça/do elemento, em relação ao operador de especificação definido pela **especificação GPS real**. Isto é feito através da implementação do operador de especificação real, num **operador de verificação real**. O processo de verificação é da responsabilidade do **metrologista** e engloba, de acordo com a ISO 17450-2, os seguintes passos:

- 1) **Operador de especificação real** – operador de especificação derivado de uma especificação real indicada na documentação técnica de produtos (ver figuras 4.34 a 4.36). Pode ser decomposto num conjunto ordenado de **operações de especificação reais** e define a mensuranda.
- 2) **Operações de especificação reais** – operações de especificação indicadas, implícita (“por omissão”) ou explicitamente (especiais), na documentação técnica de produtos. Cada uma das operações é aproximada por operações de verificação reais. Uma operação de especificação real pode ser indicada implicitamente por uma **especificação ISO de base** (ex.: Ø30 h7,



$\varnothing 38 \pm 0,1$ , Ra 0,8), explicitamente por um **elemento de especificação GPS** ou estar em falta (ver figuras 4.35 e 4.36).

- 3) **Operações de verificação reais** – operações de verificação utilizadas no processo de medição real. São organizadas num conjunto ordenado, de modo a formar o **operador de verificação real**.
- 4) **Operador de verificação real** – conjunto ordenado de operações de verificação reais. É idêntico ao processo de medição real. Poderá ser escolhido diferente do operador de verificação perfeito requerido. A divergência entre estes dois operadores é a **incerteza de medição** (incerteza do método + incerteza de implementação).
- 5) **Valor medido** – que é comparado com a especificação GPS.

## 4.11 Considerações finais

A **nova linguagem ISO de especificação geométrica de produtos (GPS)**, em desenvolvimento, fornece as bases técnicas para uma abordagem integrada dos procedimentos de especificação e de verificação geométricas. A consideração das superfícies das peças constituídas por elementos geométricos e a classificação destes baseada no conceito matemático de “grupo de simetria” desempenham um papel central nesta nova linguagem.

Através de conceitos como o de “*skin model*” e o de “operadores”, a nova linguagem GPS põe a descoberto a existência de conjuntos de operações duais, nos processos de especificação e de verificação, tornando possível harmonizar o conjunto de operações (anteriormente não referidas explicitamente) envolvidas nas especificações de tolerâncias com as operações utilizadas durante o controlo das peças.

Por sua vez, a **generalização do conceito de incerteza** pelas diferentes fases do processo de desenvolvimento de produtos permitirá uma melhor avaliação do grau de correlação entre a especificação e os requisitos funcionais, das ambiguidades que existem na própria especificação e da incerteza da medição, transformando a incerteza numa ferramenta de gestão económica dos recursos a afetar aos diferentes setores da empresa (especificação, fabricação e verificação), com vista a promover a melhoria contínua da qualidade dos produtos e dos prazos de entrega.

## 4.12 Referências

- [A1] – ALMACINHA, J. A. – *O Sistema Normativo para Uma Especificação Técnica de Produtos Adequada ao Mercado Global no Domínio da Construção Mecânica* [Em linha]. Rev. Tecnometal. Porto: AIMMAP. 2005, 159, p. 5-13. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://sigarra.up.pt/feup/pt/publs\\_pesquisa.FormView?P\\_ID=13397](http://sigarra.up.pt/feup/pt/publs_pesquisa.FormView?P_ID=13397)>.

- [A2] – ALMACINHA, J. A. – *Introdução à Nova Linguagem ISO de Especificação Geométrica de Produtos – Parte 1: A classificação dos elementos geométricos de superfície e suas aplicações* [Em linha]. Rev. Tecnometal. Porto: AIMMAP. 2005, 161, p. 7-14. [Consult. 2 nov. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://sigarra.up.pt/feup/pt/publs\\_pesquisa.FormView?P\\_ID=13398](http://sigarra.up.pt/feup/pt/publs_pesquisa/FormView?P_ID=13398)>.
- [A3] – ALMACINHA, J. A.; SIMÕES MORAIS, J. M. – *Desenho Técnico*. Texto de apoio às aulas teóricas e coleção de exercícios a executar nas aulas práticas da unidade curricular de Desenho Técnico. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FEUP. Porto: AEFEUP Editorial. 8ª ed. 2013.
- [B1] – BIALAS, S. – *Introduction*. In HUMIENNY, Z. [et al.] – *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House, 2001, cap. 1. ISBN 83-912190-8-9.
- [B2] – BOURDET, P.; SCHNEIDER, F. – *Spécification Géométrique des Produits. Cotation et tolérancement ISO*. Paris.: Dunod, 2007, cap. 2. ISBN 978-2-10-006919-4.
- [B3] – *Business Plan of ISO/TC 213 – Dimensional and geometrical product specifications and verification* [Em linha]. Versão 5 Draft 1. ISO, 2008-01-09, 14 p. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO\\_TC\\_213\\_Dimensional\\_and\\_geometrical\\_product\\_specifications\\_and\\_verification\\_.pdf?no\\_deid=999295&vernum=-2](http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO_TC_213_Dimensional_and_geometrical_product_specifications_and_verification_.pdf?no_deid=999295&vernum=-2)>.
- [C1] – CHARPANTIER, A. [et al.] – *Exploitation du concept GPS et de la normalisation pour la Spécification Géométrique des Produits* [Em linha]. Livrets 1, 2 et 3. Centre d'Etudes et de Recherche Pédagogique de l'Enseignement Technique (CERPET). Ministère de l'Education Nationale de la Recherche et de la Technologie. 1999, 75 p. [Consult. 2 fev. 2005]. Disponível em WWW:<URL: <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/3787/3787-tolerancement-gps.pdf>>.
- [C2] – CLEMENT, A. – *The resolution of positioning solids*. CIRP Annals – 1991. Vol. 40/1, p. 511.
- [C3] – CLEMENT, A.; RIVIERE, A. TEMMERMAN, M. – *Cotation Tridimensionnelle des Systèmes Mécaniques*. Ivry-sur-Seine: PYC Edition, 1994.
- [D1] – DOVMARK, J. – *New interesting concepts from ISO/TC 213* [Em linha]. CMM Club Italia Seminar. Milan. Italy. Sept. 2000. [Consult. 2 nov. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://isotc213.ds.dk/article/what.htm>>.
- [F1] – FOLEY, J. D.; VAN DAM, A. – *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*. USA: Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1982, cap. 13. ISBN 0-201-14468-9.
- [H1] – HENZOLD, H. – *Geometrical Dimensioning And Tolerancing for Design, Manufacturing And Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. 2ª ed. U.K.: Butterworth-Heinemann, 2006, cap. 8. ISBN 978-0-7506-67388.
- [H2] – HONG, Y. S.; CHANG, T.-C. – *A comprehensive review of tolerancing research* [Em linha]. Intern. Journal of Production Research. UK: Taylor & Francis Ltd. 2002, vol. 40, nº 11, p. 2425-2459. DOI: 10.1080/00207540210128242. [Consult. 20 nov. 2011]. Disponível em WWW:<<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207540210128242>>.
- [H3] – HUMIENNY, Z. – *Vectorial dimensioning and Tolerancing*. In HUMIENNY, Z. [et al.] – *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House, 2001, cap. 20. ISBN 83-912190-8-9.
- [N1] – NIELSEN, H. S. – *Specifications, operators and uncertainties* [Em linha]. 8th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing – Managing Geometric Uncertainty in the Product Lifecycle. April 28-29, 2003, Univ. of North Caroline, Charlotte, USA. [Consult. 25 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://isotc213.ds.dk/article/CIRP%20Specifications%20operators%20and%20uncertainties.pdf>>.

- [R1] – REQUICHA, A. A. G. – *Toward a Theory of Geometric Tolerancing*. International Journal of Robotics Research and Automation. Vol. 2, no. 4, p. 45-60, 1983.
- [S1] – SCHNEIDER, F. – *Outil de lecture d'un tolérancement géométrique*. Technologies & Formations. Paris: PYC Edition. 2002, 103, p. 29-35.
- [S2] – SCHNEIDER, F. – *Tolérancement Géométrique: Interprétation*. IUFM de Lorraine. Metz: Université de Metz. 2005. 106 p.
- [S3] – SRINIVASAN, V. – *A geometrical product specification language based on a classification of symmetry groups* [Em linha]. Computer-Aided Design. Vol. 31, no. 11 (1999), p. 659-668. [Consult. 2 set. 2005]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448599000664>>.
- [S4] – SRINIVASAN, V. – *Structured Parameterization and Constraints for Geometric Product Models* [Em linha]. ISO/TC 184/SC 4/WG 12 N584. 2000-05-30, 7 p. [Consult. 2 nov. 2005]. Disponível em WWW:<URL: <http://isotc213.ds.dk/jgohf/main/h-9th%20plenary%20meeting/213N358%20-%20STEP%20liaison.pdf>>.
- [S5] – SRINIVASAN, V. – *An Integrated View of Geometrical Product Specification and Verification* [Em linha]. The 7th CIRP International Seminar on Computer Aided. ENS de Cachan. France. 24 e 25-04-2001. [Consult. 2 nov. 2005]. Disponível em WWW:<URL:<http://isotc213.ds.dk/article/srini.pdf>>.
- [S6] – SRINIVASAN, V. – *Mathematical theory of dimensioning and parameterising product geometry* [Em linha]. International Journal of Product Lifecycle Management. Vol. 1, no. 1. 2005, p. 70-86. [Consult. 12 mai. 2013]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.researchgate.net/profile/Vijay\\_Srinivasan6/publication/228643408\\_Mathematical\\_theory\\_of\\_dimensioning\\_and\\_parameterising\\_product\\_geometry/links/5489c6cb0cf225bf669c7375.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Vijay_Srinivasan6/publication/228643408_Mathematical_theory_of_dimensioning_and_parameterising_product_geometry/links/5489c6cb0cf225bf669c7375.pdf)>.
- [T1] – TAKAMASU, K.; FURUTANI, R.; OZONO, S. – *Basic concept of feature-based metrology* [Em linha]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 26 (1999), p. 151-156. [Consult. 2 nov. 2005]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224199000287>>.
- [W1] – WANG, J. X. [et al.] – *Decision rules for workpieces based on total uncertainty* [Em linha]. Int. J. Adv. Manuf. Technol. (2006) 28: p. 1169–1174. [Consult. 2 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-004-2477-9#page-1>>.

#### 4.12.1 Normalização

ISO 965 (all parts)	– ISO general purpose metric screw threads -- Tolerances. ISO.
ISO/DIS 1101.2:2015	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
ISO 1101:2012/DAMd 1	– Geometrical product specifications (GPS) -- Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
ISO 1101:2012 + Cor.1:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
ISO 1302:2002	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation. ISO.
ISO 2692:2014	– Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Maximum material requirement (MMR), least material requirement (LMR) and reciprocity requirement (RPR). ISO.

#### 4.50 Visão geral sobre a linguagem ISO de especificação técnica de produtos

---

ISO 5459:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum systems. ISO.
ISO 8015: 2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals – Concepts, principles and rules. ISO.
ISO 8062 (all parts)	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts. ISO.
ISO 10303-108:2005	– Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 108: Integrated application resource: Parameterization and constraints for explicit geometric product models. ISO.
ISO 14405-1:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 1: Linear sizes. ISO.
ISO 14406:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Extraction. ISO.
ISO 14638:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Matrix model. ISO.
ISO/TR 14638:1995	– Geometrical product specification (GPS) – Masterplan. ISO.
ISO 16610 (all parts)	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration. ISO.
ISO 17450-1:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 1: Model for geometrical specification and verification. ISO.
ISO 17450-2:2012	– Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 2: Basic tenets, specifications, operators, uncertainties and ambiguities. ISO.
ISO/DIS 17450-4:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Basic concepts – Part 4: Geometrical characteristics for quantifying form, orientation, location and run-out deviation. ISO.
ISO 22432:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Features utilized in specification and verification. ISO.
ISO 25378:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Characteristics and conditions – Definitions. ISO.
ISO/IEC Guide 98-3:2008	– Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). ISO.

# **CAPÍTULO 5**

## **Princípios fundamentais de toleranciamento**



## Capítulo 5

### Princípios fundamentais de toleranciamento

#### 5.1 Introdução

Na nova linguagem ISO de especificação geométrica, a aplicação do **princípio de independência** (“*independency principle*”) (ISO 8015 e ISO 14405-1) na definição do relacionamento **entre as especificações dimensionais** (lineares e angulares) e **as especificações geométricas** (de forma, de orientação e de posição), inscritas nos desenhos técnicos e documentos técnicos afins, adquiriu uma nova centralidade.

De acordo com este **princípio fundamental**, a documentação técnica de produtos (nomeadamente os desenhos técnicos) deve abarcar todas as especificações relativas às diferentes características dimensionais e geométricas inerentes a um dado produto.

No entanto, ao longo do tempo, este princípio nem sempre tem sido respeitado em termos de tolerâncias geométricas. No passado, na maioria dos países, os desvios geométricos de orientação e de posição, sem indicação de tolerância nos desenhos, eram associados a uma “boa construção oficial corrente” indefinida. Por sua vez, em alguns países como os USA – contrariamente a muitos outros – os desvios geométricos de forma têm sido considerados controlados por intermédio da verificação das tolerâncias dimensionais (de tamanhos), em conformidade com a Regra #1 da norma americana ASME Y14.5. De acordo com esta Regra, que se aplica a elementos de tamanho (dos tipos cilindro e dois planos paralelos opostos), ver secção 6.2.1.1 deste texto, a envolvente de forma perfeita do elemento de tamanho, no máximo de matéria (limite superior de tamanho num veio ou limite inferior de tamanho num furo), não deve ser violada. Este procedimento, antigamente denominado de “princípio de Taylor” é atualmente designado por “**requisito de envolvente**”, na linguagem GPS ISO (ver capítulo 6).

Este requisito, necessário para fins de ajustamento entre elementos geométricos de peças conjugadas, é supérfluo na maioria dos restantes casos funcionais. Revisões de desenhos técnicos efetuadas em diferentes países mostraram que, geralmente, apenas menos de 10 % dos elementos (tamanhos), num desenho, deveriam ser associados com o “requisito de envolvente”. Mais de 90 % dos elementos não necessitam de satisfazer este requisito, uma vez que a sua função admite desvios geométricos, mesmo quando todos os tamanhos locais reais do elemento estão no seu tamanho de máximo de matéria [H1].

Em termos do controlo dimensional das peças, no âmbito da metrologia convencional, o “requisito de envolvente” só pode ser verificado se forem utilizados calibres “PASSA” de “forma completa”, de modo a assegurar a não violação da “condição de máximo de matéria” do elemento, simultaneamente, em toda a sua extensão, embora, na maioria dos casos, se utilizem apenas “calibres maxila” (“*snap gauges*”) ou instrumentos de medição que não permitem uma verificação completa do “requisito de envolvente” (ver figuras 6.5 e 6.6).

Por sua vez, na produção, para respeitar o “requisito de envolvente”, um elemento geométrico cilíndrico, por exemplo, deve ser fabricado com tamanhos locais reais que se afastem do tamanho de máximo de matéria, pelo menos, do valor dos desvios geométricos esperados para a retitude e a circularidade. Logo, deixa-se ser possível tirar o proveito máximo da tolerância dimensional para os tamanhos (locais) reais. No entanto, frequentemente, tal acaba por não ser respeitado.

A partir da medição de peças produzidas, sabe-se também que a magnitude dos desvios de forma permitida pelo “requisito de envolvente” não está em consonância com a “**exatidão oficial corrente**” de muitas empresas industriais. Os desvios geométricos de forma registados em peças obtidas por processos correntes de corte por arranque de apara, por vezes, são maiores do que as apertadas tolerâncias dimensionais especificadas. Com base em aproximadamente 10 000 medições, realizadas em 17 empresas, na Suíça, constatou-se que, em cerca de 20 %, o desvio de retitude era maior do que a tolerância dimensional. Como há também a considerar desvios de circularidade e variações de tamanho, muito mais de 20 % dos elementos medidos violaram o “requisito de envolvente”, embora as empresas tenham a pretensão de que fabricam de acordo com este requisito. Medições efetuadas na Alemanha, no Japão e no Reino Unido permitiram chegar às mesmas conclusões. Por outro lado, tolerâncias dimensionais largas, por exemplo da classe h14, são muito maiores do que os desvios de forma que ocorrem por meio de processos correntes de corte por arranque de apara (comparar os valores dos quadros 6.8 e 9.4). Por conseguinte, as tolerâncias gerais de forma, tratadas de um modo mais desenvolvido no capítulo 9 deste texto, parecem estar mais em conformidade com a capacidade de fabricação corrente do que com uma dependência do “requisito de envolvente” [H1].

Os factos descritos levaram a que, ao longo de muitos anos, a relação entre as tolerâncias dimensionais e geométricas tenha sido descrita e definida de maneiras diferentes em muitos países. Alguns adotaram, por omissão, o “requisito de envolvente” (ver, p. ex., as normas ASME Y14.5 e DIN 7167), outros tratavam as tolerâncias dimensionais e geométricas de modo independente. Certos países consideravam a indicação de uma tolerância geométrica num elemento como uma não aplicação do “requisito de envolvente”, ao contrário de outros. Em alguns países, foi assumido que o elemento não devia violar a envolvente de forma perfeita de tamanho no mínimo de matéria, enquanto noutros não. Mesmo dentro das empresas, as opiniões são variadas. Enquanto os projetistas, geralmente, tendem para o conceito do “requisito de envolvente”, os metrologistas referem o facto de que, geralmente, tamanho e forma (e orientação e localização) são verificados independentemente uns dos outros [H1].



Uma vez que a situação descrita era considerada insatisfatória, em 1985, o Comitê técnico ISO/TC 10 decidiu normalizar, através da norma ISO 8015 o “**princípio de independência**” como o princípio fundamental de toleranciamento. No entanto, os desenhos em que se aplicasse este princípio deviam ser identificados através da indicação “**Toleranciamento ISO 8015**”, no interior ou junto da legenda. Esta indicação devia ser complementada pela referência à norma apropriada para as tolerâncias geométricas gerais ou a outros documentos afins.

No entanto, a partir de 2010, com a publicação da norma ISO 14405-1, complementada pela norma ISO 8015:2011 (2ª ed.), **o princípio de independência passou a ser aplicado por omissão**, assumindo um papel determinante na nova linguagem GPS ISO. A utilização de outra especificação para tamanhos, por omissão, específica do desenho deve ser inscrita com a indicação do(s) respetivo(s) modificador(es) de especificação, no interior ou junto da legenda, tal como por exemplo “Tamanho ISO 14405 **ⓔ**”, para o caso de adoção do requisito de envolvente (ver capítulo 6).

Neste contexto, normalmente, o projetista começa a traduzir as necessidades funcionais através da definição da configuração da peça. Tendo como pano de fundo o conjunto e a montagem, toma em consideração, fundamentalmente, os elementos geométricos nominais (ideais). Como não é possível fabricar objetos sem a existência de desvios geométricos, tem de admitir, também, a existência de desvios em relação à configuração nominal, desde que estes não afetem a função pretendida [G1]. Esta etapa corresponde à consideração do modelo de superfície não ideal (“*skin model*”) da peça, onde vão ser simuladas, **com base em noções teóricas, em ensaios ou em ambos**, as variações da superfície a um nível conceptual.

Durante o processo de definição das tolerâncias de peças simples ou de grupos de componentes, deve ser sempre decidido se o princípio de independência (**o princípio fundamental**, por omissão) pode ser tomado em consideração para uma dimensão toleranciada (“**tamanho local entre dois pontos**”) ou se deve ser adotada uma interdependência entre tamanho e geometria, tal como, por exemplo, o requisito de envolvente, abordado no capítulo 6 deste texto, tendo em conta a funcionalidade pretendida para o elemento toleranciado.

A alteração da especificação ISO, por omissão, poderá ser aplicada a todo o desenho, através da introdução de uma indicação geral, no interior ou junto da legenda, ou apenas a alguns elementos geométricos, através da indicação, junto dos tamanhos toleranciados, dos símbolos modificadores de especificação apropriados. No caso do requisito de envolvente, o símbolo **ⓔ**.

Complementarmente, deve também ser decidido se uma **tolerância geométrica** de forma, de orientação ou de posição (ver capítulo 7) deve ser especificada de modo independente ou se o **requisito de máximo de matéria, de mínimo de matéria ou de reciprocidade** pode ser tomado em consideração para certas tolerâncias geométricas (ver figura 5.1). Estes últimos requisitos são abordados no capítulo 8 deste texto.

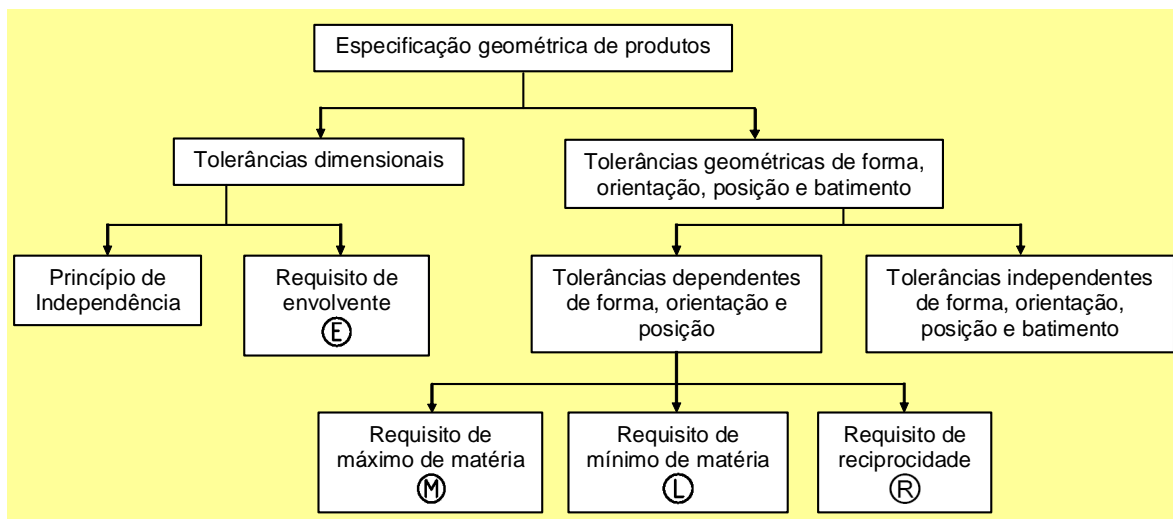


Figura 5.1 – Relacionamento entre tolerâncias dimensionais e geométricas. Adaptada de [G1]

Para além dos requisitos de toleranciamento já referidos, outras condições, tais como o **elemento toleranciado projetado** (P), em conformidade com a ISO 1101, ou o **toleranciamento de peças não rígidas** (F), em conformidade com a ISO 10579, podem também ser utilizadas em desenhos de engenharia.

## 5.2 O Princípio de independência

De acordo com este princípio fundamental, **por omissão**, cada especificação dimensional ou geométrica especificada, para um dado elemento ou para uma relação entre elementos geométricos, deve ser respeitada independentemente de outras especificações, a menos que uma relação particular entre elas seja especificada numa norma ou através de uma indicação especial (por exemplo, através dos símbolos modificadores (E), (M), (L) ou CZ), no quadro da especificação considerada.

No entanto, os desenhos em que se aplique este princípio fundamental, como princípio de aplicação geral a todo o desenho, poderão ser identificados, em termos opcionais e a título informativo, através da seguinte inscrição colocada no interior ou junto da legenda do desenho:

Toleranciamento ISO 8015

Presentemente, esta indicação passou também a invocar todo o sistema GPS ISO, o que significa que, na documentação técnica em análise, se aplicam todas as normas e princípios fundamentais GPS.

Com este princípio fundamental, **uma tolerância dimensional linear controla apenas os tamanhos locais reais (medições entre dois pontos) de um elemento de tamanho** (ver secção 6.2.1.1), mas não os seus desvios de forma [por exemplo, desvios de retitude e de circularidade de um elemento cilíndrico (ver figura 5.2) ou desvios de planeza de duas superfícies paralelas opostas].

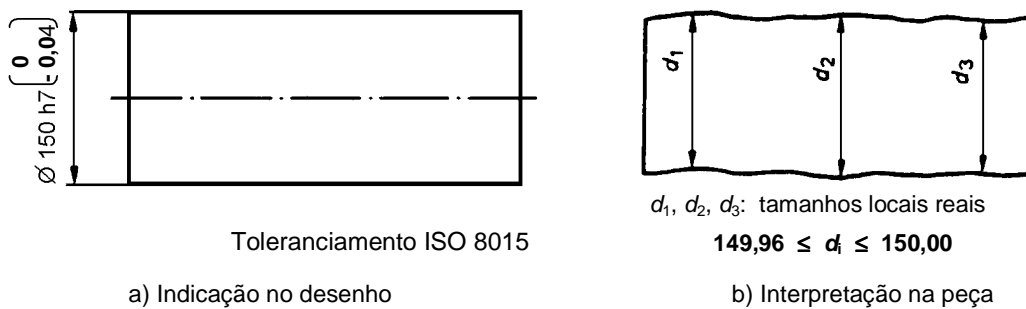


Figura 5.2 – Desenho respeitando o princípio de independência

Não existe controlo da relação geométrica entre elementos geométricos individuais por meio de tolerâncias dimensionais lineares. Por exemplo, **a perpendicularidade dos lados de um cubo não pode ser controlada por essa via, exigindo-se, assim, uma tolerância de perpendicularidade** (geral ou individual) ditada por requisitos de concepção (ver exemplos na figura 5.3).

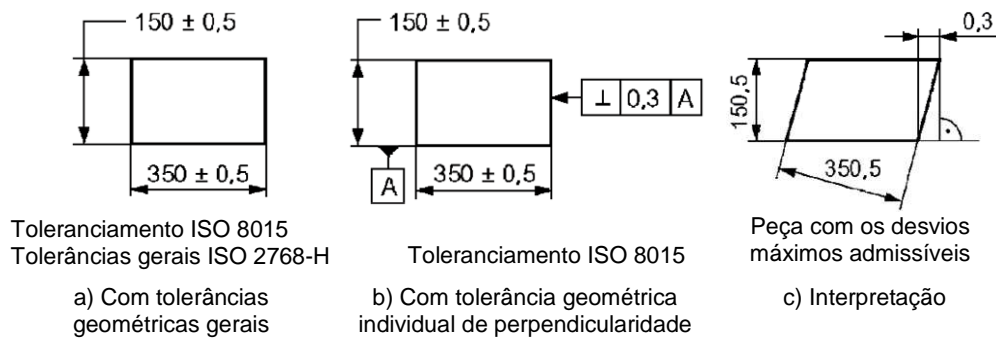


Figura 5.3 – Princípio de independência: tamanho e orientação

Por sua vez, **uma tolerância angular especificada, em unidades angulares, controla apenas a orientação entre duas linhas retas associadas**, estabelecidas a partir das linhas extraídas com base na interseção da superfície extraída com um plano, em qualquer uma das secções retas consideradas (**tamanho angular**), mas não os seus desvios de forma. Num elemento prismático, este plano de interseção é perpendicular à linha reta de interseção das duas superfícies associadas às superfícies extraídas (ver figura 5.4).

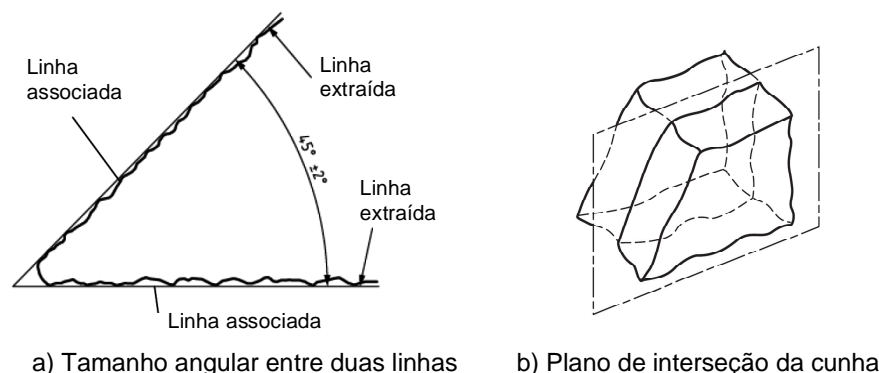


Figura 5.4 – Tolerância angular numa secção reta qualquer de uma cunha

Na nova linguagem ISO, por omissão, as dimensões lineares e angulares toleranciadas limitam apenas, inequivocamente, os tamanhos definidos, em conformidade, respetivamente, com as normas ISO 14660-2 (ISO 17450-3) e ISO/FDIS 14405-3 (ver capítulo 6), por meio de procedimentos numéricos a implementar em máquinas de medição de coordenadas (CMM – “*Coordinate measuring machines*”).

Finalmente, as **tolerâncias geométricas** controlam o desvio do elemento em relação à sua forma, orientação ou posição teoricamente exata, independentemente do tamanho do elemento. Deste modo, as tolerâncias geométricas aplicam-se independentemente dos tamanhos locais reais de elementos individuais (figura 5.5). Os desvios geométricos podem ser máximos, quer as secções retas dos respetivos elementos estejam no seu tamanho de máximo de matéria ou não.

Neste exemplo, um veio com um tamanho no máximo de matéria ( $\varnothing 150,00$  mm), numa secção reta qualquer, pode ter um desvio de forma transversal (triangulação) dentro da tolerância de circularidade de  $[0,02$  mm] e também um desvio longitudinal (flecha) com o valor da tolerância de retitude de  $[0,06$  mm] indicadas no desenho.

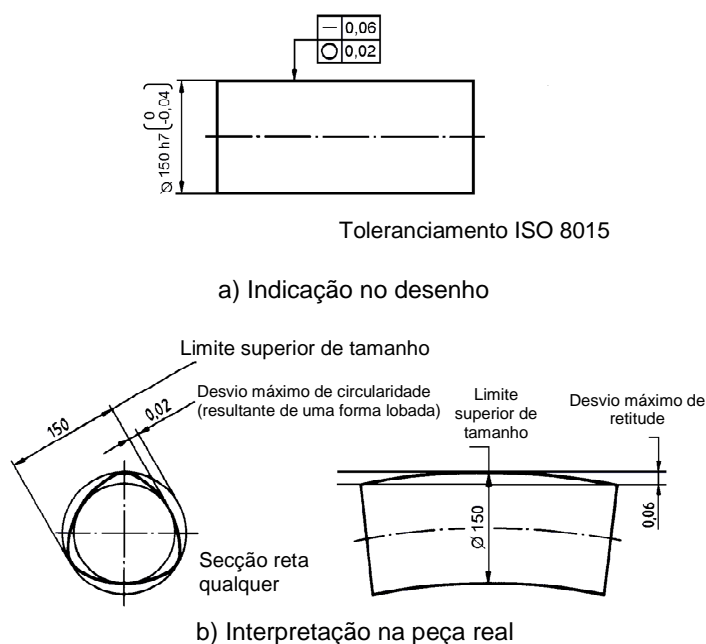


Figura 5.5 – Desenho respeitando o princípio de independência. Adaptada da ISO 8015:1985

Este tipo de toleranciamento não seria adequado para uma peça “veio” que devesse ser ajustada a uma peça “furo”, mas é suficiente para muitas situações em que este requisito não é necessário, com as consequentes vantagens económicas.

Em muitos casos de aplicação corrente, exige-se que todas as medições entre dois pontos de um elemento estejam dentro da zona de tolerância dimensional, mas a limitação dos seus desvios geométricos de retitude e de circularidade, por exemplo, não é um requisito crucial, uma vez que não há necessidade de proceder ao seu ajustamento com outro componente. Nestes casos, a limitação dos desvios geométricos de forma pode ser estabelecida de modo satisfatório através do simples toleranciamento geométrico geral (ver capítulo 9).

No entanto, com a verificação exclusiva dos **tamanhos entre dois pontos**, sobretudo por intermédio de instrumentos de metrologia convencional (“*hard metrology*”), tais como micrómetros, paquímetros, etc., o princípio de independência pode dar origem a situações diversas e, nalguns casos, extremas.

A título de exemplo, analise-se o caso de um veio circular, toleranciado de acordo com o princípio de independência, em que os respectivos desvios geométricos de forma são limitados, apenas, por via do toleranciamento geral. No que toca aos desvios de circularidade, por exemplo, tendo em conta a definição da zona de tolerância de circularidade, em conformidade com a norma ISO 1101 (ver capítulo 7), se as **secções retas fossem ovalizadas**, os desvios de circularidade,  $E_O$ , poderiam ser, no máximo, iguais a metade da tolerância dimensional,  $T_D$  [ver figura 5.6 a)], mas, já **no caso de um cilindro achatado**, os mesmos desvios poderiam atingir o valor da tolerância dimensional [ver figura 5.6 b)], de modo que, em ambos os casos, os tamanhos locais reais pudessem respeitar a tolerância dimensional especificada no desenho.

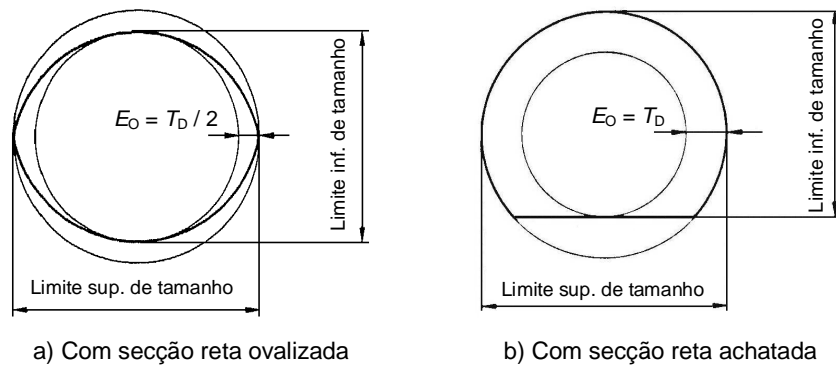
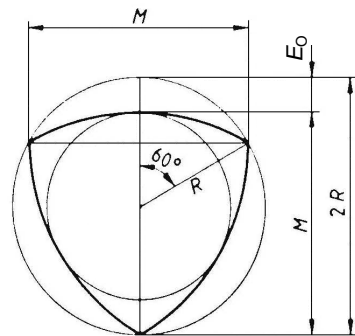


Figura 5.6 – Desvios máximos admissíveis de circularidade. Adaptada da DIN 7168-2

Por outro lado, se o desvio de circularidade tiver uma **configuração trilobada** (triangular), o tamanho de máximo de matéria pode ser excedido, sem que tal possa ser avaliado através de medições entre dois pontos, uma vez que todos os pontos opostos permanecem à mesma distância [ver figura 5.7 a)].



a) Com secção recta trilobada

$$R = M / (2 \sin 60^\circ)$$

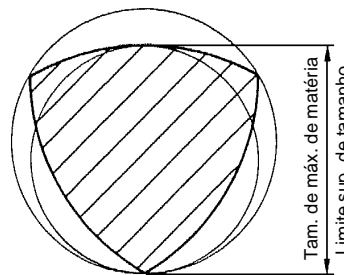
$$2 R = 1,15 M = E_O + M$$

$$E_O = 0,15 M$$

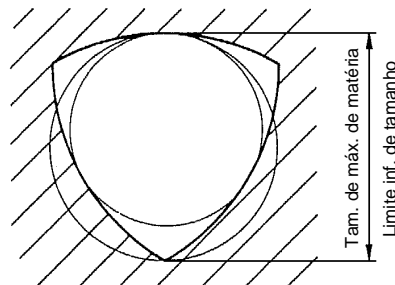
Com:

$M$  – tamanho de máximo de matéria

$2 R$  – tamanho de montagem



b) Desvio em peça “veio”



c) Desvio em peça “furo”

Figura 5.7 – Desvio de circularidade máximo admissível. Adaptada da DIN 7168-2

Isto significa que, através da medição entre dois pontos, com instrumentos de metrologia convencional, se obtém um falso perfil circunferencial perfeito, apesar da presença de desvios de forma evidentes [ver exemplo na figura 6.25 a)]. Como o diâmetro toleranciado é verificado para conformidade apenas com medições entre dois pontos, o **tamanho de montagem**  $2R$  (tamanho mínimo circunscrito, para um elemento exterior, e tamanho máximo inscrito, para um elemento interior) pode ser maior [ou menor, no caso de uma peça “furo”, ver figura 5.7 c)] do que o diâmetro entre dois pontos, até um máximo de 15 %, no caso de um desvio com uma configuração trilobada perfeita.

Com a utilização do princípio de independência, o veio da figura 5.7 b) não seria rejeitado, pois os valores das medições entre dois pontos estão dentro dos limites de tolerância, mas, provavelmente, não satisfaria os requisitos especificados pelo projetista.

Neste caso, para verificar a conformidade do veio com a tolerância geral de circularidade, os respectivos desvios deverão ser inspecionados, no caso de uma fabricação especial (por exemplo, retificação cilíndrica sem centros ou aperto em bucha concêntrica com três grampos), através do método convencional de medição em 3 pontos (ver a norma ISO 4292) ou de uma CMM. Na fabricação, deve ser tido em conta que a circunferência com tamanho de máximo de matéria pode ser violada, apesar da tolerância geral de circularidade ter sido respeitada [ver figuras 5.7 b) e c)].

Os desvios de circularidade com **configurações ovalizadas ou trilobadas** resultam, geralmente, de uma má fixação da peça e/ou da ferramenta de corte. Uma vez que um desvio com uma configuração trilobada representa um caso extremo, em termos do princípio de independência, é um bom exemplo para assinalar os limites e as propriedades deste princípio.

Em termos gerais, os desvios geométricos de forma e de paralelismo não são limitados pelo princípio de independência, excepto nos casos dos desvios longitudinais em forma de tonel, de diábolo e de cone, e dos desvios de forma transversais com um número par de lobos (como p. ex. a secção ovalizada) (ver figuras 7.6 e 7.7, do capítulo 7). Todos os outros desvios longitudinais e transversais com um número ímpar de lobos não podem ser verificados por meio deste princípio.

Normalmente, durante a fase de fabricação, não é óbvio quais os tipos de desvios que podem ser originados pela produção. Logo, em certos casos, as tolerâncias geométricas são estabelecidas a partir de requisitos funcionais e de tolerâncias dimensionais.

O **princípio de independência** deverá ser, geralmente, utilizado para todos os elementos geométricos das peças que não se destinem a ser ajustados a outros elementos.

Se for requerida uma relação particular entre tamanho e forma, tamanho e orientação ou tamanho e posição, tal deve ser especificado no desenho.

### 5.3 Algumas observações acerca do princípio de independência

O **princípio de independência** – princípio fundamental de toleranciamento – permite ler cada uma das especificações, indicadas num desenho, sem ter em conta as outras. De acordo com este princípio, existe independência entre o tamanho toleranciado e as características geométricas de forma, orientação e posição do elemento. A tolerância linear de um tamanho limita, pois, unicamente os tamanhos locais reais do elemento, mas não os seus desvios geométricos de forma, orientação e posição.

No entanto, **aquela interpretação deste princípio fundamental não é extensível à independência das especificações das características geométricas de forma, orientação e posição**, uma vez que as respetivas tolerâncias geométricas não as restringem de uma forma exclusiva [S1]. As tolerâncias geométricas de orientação restringem os desvios das características de orientação e de forma e as tolerâncias geométricas de posição restringem os desvios das características de posição, de orientação e de forma, conforme será referido em detalhe no capítulo 7.

Assim, na ausência de qualquer requisito particular, **as tolerâncias geométricas expressas num desenho devem ser interpretadas independentemente umas das outras**, de acordo com o **princípio de independência**, já que elas correspondem a especificações diferentes, mas, por outro lado, aquando do estabelecimento das zonas de tolerância, elas criam uma dependência entre os desvios das diferentes características. Com as atuais normas ISO, não é possível especificar, unicamente, a característica de orientação ou a característica de posição.

No exemplo apresentado na figura 5.8, foram especificadas, em simultâneo, características de posição (localização,  $\oplus$ ), de orientação (paralelismo,  $//$ ) e de forma (planeza,  $\square$ ) do elemento “plano superior”, assim como uma característica dimensional intrínseca do elemento de tamanho (“*feature of size*”) constituído pelo “par de planos paralelos opostos”.

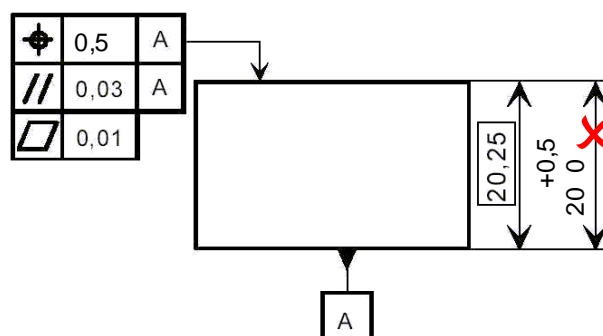


Figura 5.8 – Relações entre especificações dimensionais e geométricas. Adaptada de [S1]

A especificação superabundante (neste caso, dimensão linear em simultâneo com a tolerância de localização) e a compatibilização entre os valores das diferentes tolerâncias indicadas resultam de um princípio geral de coerência e não da aplicação do princípio de independência [S1]. Embora a

especificação superabundante pudesse ser justificada, as normas recusam-na, no que diz respeito às dimensões lineares funcionais e, certamente, o mesmo se verificará em termos das tolerâncias geométricas.

Finalmente, assinala-se que, em termos do toleranciamento geométrico (de localização, de perfil ou de inclinação), as dimensões que definem a posição, o perfil ou o ângulo são dimensões teoricamente exatas, representadas enquadradas ou indicadas de um modo implícito através de valores particulares (p. ex. 0 mm, 0°, 90°).

## 5.4 Outros princípios fundamentais GPS ISO

Para além do princípio de independência, a atual norma ISO 8015:2011 especifica conceitos, princípios e regras fundamentais que estão na base da criação, interpretação e aplicação de todos os documentos normativos, no domínio da especificação geométrica de produtos (GPS). Neste âmbito, considera-se que um **conceito** é uma ideia abstrata, um **princípio** é uma verdade normalizada apoiada em conceitos, nos quais se baseiam as regras; e uma **regra** é um procedimento normalizado (para a ação).

Os outros princípios fundamentais GPS ISO a considerar são os seguintes:

- a) **Princípio da invocação:** Sempre que uma porção do sistema GPS ISO é invocada num documento de um produto de engenharia mecânica (p. ex. a utilização, num desenho, de uma ou mais especificações GPS, tais como  $\varnothing 30\ h7$  ou  $\varnothing 38 \pm 0,1\ (\text{E})$ ), todo o sistema GPS ISO, descrito na norma ISO 14638, está a ser invocado.

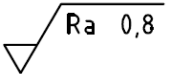
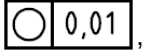

A expressão “**Toleranciamento ISO 8015**” pode ser indicada, em termos opcionais e a título informativo, no interior ou junto da legenda, mas não é requerida para invocar o sistema GPS ISO.

- b) **Princípio da hierarquia das normas GPS:** O sistema GPS ISO é definido através de uma hierarquia de normas que inclui os seguintes tipos de normas, indicados de modo ordenado: normas **GPS fundamentais**, normas **GPS gerais** e normas **GPS complementares** (ver secção 4.2.2). As regras fornecidas nas normas de um nível hierárquico superior aplicam-se em todos os casos, salvo se, em normas de nível hierárquico inferior, tiverem sido estabelecidas outras regras, de um modo específico.
- c) **Princípio do desenho definitivo:** O desenho é definitivo. Todos os requisitos devem estar especificados no desenho, através do uso de simbologia GPS; logo não podem ser impostos quaisquer outros requisitos não especificados no desenho.
- d) **Princípio do elemento:** Uma peça deve ser considerada composta por um número de elementos geométricos limitados por fronteiras naturais. Por omissão, todas as especificações



GPS para um elemento ou relação entre elementos aplicam-se ao(s) elemento(s) completo(s) e cada especificação GPS aplica-se apenas a um elemento ou a uma relação entre elementos. Este princípio pode ser ultrapassado se existirem indicações explícitas no desenho (p. ex. **ACS**, **2x**, **CZ**).

- e) **Princípio das casas decimais:** Nas especificações inscritas nos desenhos ou em normas, as casas decimais não indicadas são zeros (p. ex. **0,2** é igual a **0,200000....**, **10** é igual a **10,0000...**).
- f) **Princípio da especificação por omissão:** Um conjunto ordenado de operações (**operador**) de especificação completo pode ser indicado através da utilização de **especificações GPS ISO de base**, tais como, por exemplo:

$\varnothing 30\ h7$ ,  $\varnothing 38 \pm 0,1$ , , , 

Este tipo de especificações indica que o requisito é baseado em operadores de especificação por omissão (definidos nas normas, mas não diretamente visíveis no desenho). **Especificações GPS especiais** podem ser indicadas na documentação técnica de produtos, através da utilização de símbolos modificadores ou anotações curtas (ver figura 4.36).

- g) **Princípio da condição de referência:** Por omissão, as especificações GPS aplicam-se em condições de referência [p. ex. **temperatura de referência de 20 °C** (ISO 1) para a especificação geométrica e sua verificação e **peça livre de contaminantes**]. Condições adicionais, tais como **condições de humidade**, devem ser especificadas no desenho.
- h) **Princípio da peça rígida:** Por omissão, considera-se que a peça é infinitamente rígida e que todas as especificações GPS se aplicam no seu **estado livre**, em que permanece não deformada por ação de quaisquer forças externas, incluindo a força da gravidade. Condições adicionais devem ser especificadas no desenho (ver, por exemplo, a norma ISO 10579).
- i) **Princípio da dualidade:** Este princípio estabelece que:
- 1) uma especificação GPS define um conjunto ordenado de operações de especificação independente de qualquer procedimento ou equipamento de medição e que
  - 2) o conjunto de operações de especificação é transformado em realidade por meio de um conjunto de operações de verificação, que é independente dessa especificação GPS, mas que deve refletir o seu conjunto ordenado de operações de especificação.

A especificação GPS não dita quais os operadores de verificação que são aceitáveis. A aceitação de um operador de verificação é avaliada tendo em conta a incerteza de medição e qualquer **ambiguidade da especificação**.

- j) **Princípio do controlo funcional:** A especificação de uma peça é completa quando todas as funções concebidas para a peça são descritas e controladas com especificações GPS. Na maioria dos casos, a especificação vai ser incompleta, pois algumas funções são descritas/controladas de modo imperfeito ou não o são de todo (ver figura 4.35). Logo, pode haver uma boa ou má correlação entre a função e o conjunto de especificações GPS utilizado. Qualquer falta de correlação entre os requisitos funcionais e os requisitos das especificações GPS resulta numa **ambiguidade da descrição da função**.
- k) **Princípio de especificação geral:** Por omissão, as especificações GPS gerais (indicadas no interior ou junto da legenda do desenho) aplicam-se apenas a uma característica de um elemento ou de uma relação entre elementos, para a qual não foi indicada qualquer especificação GPS individual do mesmo tipo. Sem a indicação de qualquer especificação GPS geral (p. ex. **tolerâncias dimensionais e geométricas gerais**), inscrita no interior ou junto da legenda do desenho, apenas se aplicam as especificações (tolerâncias) individuais inscritas no desenho.
- l) **Princípio de responsabilidade:** A **ambiguidade da descrição da função e a ambiguidade da especificação** descrevem, em conjunto, a proximidade entre o operador (conjunto ordenado de operações) de especificação e o operador funcional. A **incerteza de medição**, que é da responsabilidade de quem faz prova da conformidade ou da não conformidade da superfície real da peça com a especificação, quantifica a proximidade do operador de verificação com o operador de especificação.

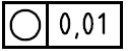
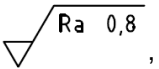
## 5.5 Regras para a indicação de especificações GPS por omissão

De acordo com a norma ISO 8015:2011, o toleranciamento nos desenhos técnicos pode ser simplificado através da utilização de **especificações GPS por omissão** ("by default"). Um conjunto de operações (operador) de especificação por omissão (ver figura 4.34) pode ser estabelecido através da indicação de:

- uma especificação GPS ISO geral, por omissão;
- uma especificação GPS geral, por omissão, alterada (ou transformada).

### a) Especificação GPS ISO geral, por omissão

Quando uma **especificação ISO de base**, em conformidade com as normas:

- ISO 14405-1 – tolerâncias dimensionais, p. ex.  $\varnothing 38 \pm 0,1$ ,
- ISO 1101 – tolerâncias geométricas, p. ex. ,
- ISO 1302 – estados de superfície, p. ex. ,
- etc.

é a especificação real para uma qualquer característica geométrica, no desenho, e não foi indicada qualquer especificação GPS geral, por omissão, alterada, no interior ou junto da legenda, o operador de especificação ISO, por omissão, é o requerido pela norma ISO em vigor que define esse operador. Geralmente, as normas GPS ISO não fornecem parâmetros por omissão para todas as operações de especificação, em todos os operadores. Consequentemente, muitos operadores de especificação ISO, por omissão, não estão completos (ver figura 4.35).

b) Especificação GPS geral, por omissão, alterada (ou transformada)

Um operador de especificação geral, por omissão, alterado (ou transformado) deve estar definido num documento relevante, de um modo cuidado, inequívoco e exaustivo, de forma a poder ser considerado como um operador de especificação completo.

O operador de especificação geral, por omissão, alterado deve ser indicado, no desenho, no interior ou junto da legenda, em conformidade com as regras enunciadas na norma ISO 8015 (ver figura 5.9), que incluem:

- a palavra “Toleranciamento” ou “Toleranciamento ISO 8015”;
- o símbolo  $\textcircled{\text{AD}}$ , que significa “*Altered Default*”, isto é “omissão alterada”;
- a identificação completa do documento relevante e outra informação necessária.

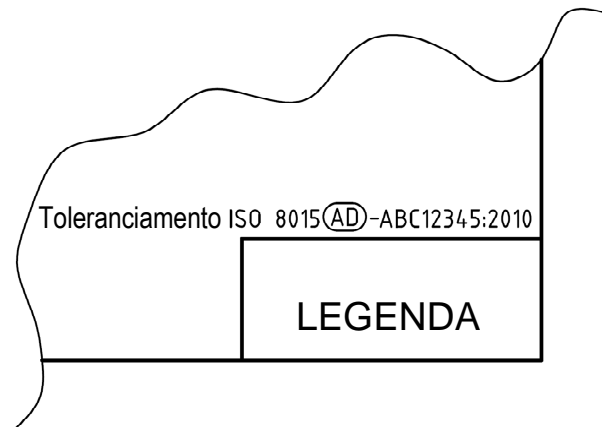


Figura 5.9 – Exemplo de indicação de um operador de especificação geral, por omissão, alterado (ISO 8015)

Se forem utilizados, no desenho, vários operadores de especificação geral, por omissão, alterada, cada símbolo  $\textcircled{\text{AD}}$  deve ser seguido por um número (ver figura 5.9).

Algumas normas ISO fornecem meios para alterar a especificação ISO geral, por omissão, p. ex. o “Tamanho local entre dois pontos” para especificações gerais, por omissão, específicas do desenho, tal como, p. ex., o “requisito de envolvente” (ver capítulo 6, secção 6.3.4), através da inscrição da indicação “Tamanho ISO 14405  $\textcircled{\text{E}}$ ”, no interior ou junto da legenda.

O símbolo  $\textcircled{\text{AD}}$  é utilizado apenas quando se aplicam normas GPS que não são normas ISO.

## 5.6 Regras para a indicação de especificações GPS especiais

**Os conjuntos de operações** (operadores) **de especificação especiais** para qualquer característica geométrica devem ser indicados por intermédio da adição de informação (requisitos) complementar à **especificação ISO de base**, tal como, p. ex.:  $\varnothing 38 \pm 0,1 \text{ (E)}$

A informação complementar adicionada muda as operações no conjunto de operações de especificação definido por omissão, sendo definida como um **modificador de especificação** (ver figura 4.36 e norma ISO 17450-2).

As operações de especificação sem requisitos complementares assinalados no operador de especificação especial indicados permanecem como definidas pela especificação por omissão, em conformidade com a especificação ISO de base. Como, presentemente, as normas GPS ISO não fornecem “condições por omissão” (“*by default*”) para todas as operações de especificação em todos os operadores de especificação, muitas especificações ISO de base não estão completas (ver figura 4.35).

A técnica descrita, seguidamente, deve ser aplicada para a indicação dos operadores de especificações especiais em

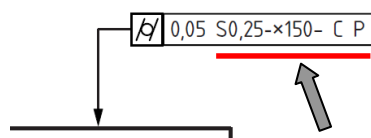
- elementos geométricos toleranciados individualmente, em conformidade com as normas ISO 1101, ISO 1302, ISO 5459, etc., e
- especificações, por omissão, específicas do desenho.

Se necessário, a informação complementar (requisitos) adicionada à especificação ISO de base poderá alterar as operações por omissão da especificação ISO de base. Exemplos desta informação são:

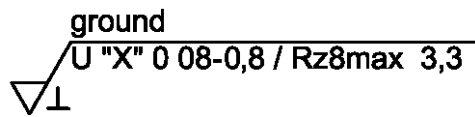
- a) a regra de associação,
- b) o tipo de filtro,
- c) a banda de transmissão,
- d) a ponta do apalpador, e
- e) o esquema de amostragem.

Ao alterar qualquer uma destas operações por omissão, para uma necessidade específica da concepção, a especificação ISO de base deve ser modificada do seguinte modo:

- no caso de uma especificação da norma ISO 1101, através da indicação de informação adicional na segunda secção do indicador de tolerância (ver capítulo 7), tal como, p. ex.:



- no caso de uma especificação da norma ISO 1302, através da indicação de informação adicional nas posições a) a e) do símbolo gráfico completo para o estado de superfície (ver secção 10.9), tal como, p. ex.:



- no caso de uma especificação da norma ISO 14405-1, através da adição de modificadores à indicação da tolerância (ver secção 6.3.3), tal como, p. ex.:

$10 \pm 0,1$  (LP) (SA) (F) ;  $2 \times 10 \pm 0,1$  (E) CT

Atualmente, as normas GPS ISO não definem todos os modificadores de especificação necessários.

Por fim, nos desenhos técnicos, as menções indicadas entre parêntesis são dadas apenas a título informativo e não constituem uma parte integrante da especificação / do requisito.

## 5.7 Considerações finais

Durante décadas, o relacionamento entre as especificações dimensionais (lineares e angulares) e as especificações geométricas (de forma, de orientação e de posição), inscritas nos desenhos técnicos foi descrito e definido de modos variados em países diferentes, registando-se fortes lacunas em termos da especificação de diversas características geométricas.

No passado, na maioria dos países, os desvios relativos às características geométricas de orientação e de posição, sem indicação de tolerância nos desenhos, eram associados a uma “boa construção oficial corrente” indefinida. Alguns países adotaram, por omissão, o “princípio de Taylor”, atualmente designado por “requisito de envolvente”, de modo a poderem “controlar” os desvios geométricos de forma, por intermédio da verificação das tolerâncias dimensionais (de tamanhos), enquanto outros tratavam as tolerâncias dimensionais e geométricas de modo independente.

Revisões de desenhos técnicos efetuadas em diferentes países mostraram que, geralmente, apenas menos de 10 % dos elementos (tamanhos), num desenho, necessitam de ser associados com o “requisito de envolvente”, para fins de ajustamento entre elementos geométricos de peças conjugadas. No entanto, mais de 90 % dos elementos não precisam de satisfazer este requisito, uma vez que a sua função admite desvios geométricos, mesmo quando todos os tamanhos locais reais do elemento estão no seu tamanho de máximo de matéria [H1].

A partir da medição de peças produzidas, concluiu-se também que a magnitude dos desvios de forma permitida pelo “requisito de envolvente” não está em consonância com a “**exatidão oficial corrente**” de muitas empresas industriais. Com base em aproximadamente 10 000 medições, realizadas em 17

empresas, na Suíça, constatou-se que muito mais de 20 % dos elementos medidos violavam o “requisito de envolvente”. Medições efetuadas na Alemanha, no Japão e no Reino Unido permitiram chegar às mesmas conclusões. Por outro lado, tolerâncias dimensionais largas, por exemplo da classe h14, são muito maiores do que os desvios de forma que ocorrem por meio de processos correntes de corte por arranque de apra [H1].

Assim, ao longo de muitos anos, a relação entre as tolerâncias dimensionais e geométricas foi descrita e definida de maneiras diferentes em muitos países e mesmo no interior das empresas. Face à situação descrita, em 1985, o Comité técnico ISO/TC 10 decidiu normalizar, através da norma ISO 8015 o “**princípio de independência**” como o princípio fundamental de toleranciamento, desde que os desenhos contivessem a indicação “**Toleranciamento ISO 8015**”, no interior ou junto da legenda. Esta indicação devia ser complementada pela referência à norma apropriada para as tolerâncias geométricas gerais ou a outros documentos afins.

No entanto, a partir de 2010, com a publicação da norma ISO 14405-1, complementada pela norma ISO 8015:2011 (2ª ed.), o **princípio de independência** (*“independency principle”*) **passou a ser aplicado por omissão, assumindo um papel determinante na nova linguagem ISO de especificação geométrica**. Com este princípio, cada especificação dimensional ou geométrica especificada, para um dado elemento ou para uma relação entre elementos geométricos, deve ser respeitada independentemente de outras especificações, a menos que tenha sido estabelecida uma relação particular entre elas. Logo, por omissão, **uma tolerância dimensional linear controla apenas os tamanhos locais reais (medições entre dois pontos) de um elemento de tamanho**

O **princípio de independência** não deverá ser, geralmente, utilizado em elementos geométricos de peças que se destinem a ser ajustados a outros elementos de peças conjugadas, mas é suficiente para a maioria das situações em que este requisito não é necessário, com as consequentes vantagens económicas daí resultantes.

Num desenho, na ausência de qualquer requisito particular, as **tolerâncias geométricas**, expressas para cada elemento geométrico de uma dada peça, devem ser interpretadas independentemente umas das outras, de acordo com o princípio de independência, já que elas correspondem a especificações diferentes, mas, por outro lado, aquando do estabelecimento das zonas de tolerância, deve ter-se em conta que elas criam uma dependência entre os desvios das diferentes características, um vez que as tolerâncias geométricas de orientação restringem os desvios das características de orientação e de forma e as tolerâncias geométricas de posição restringem os desvios das características de posição, de orientação e de forma.

A atual norma ISO 8015 estabelece também **outros doze princípios fundamentais** que estão na base da aplicação e interpretação de todos os documentos normativos no domínio da especificação geométrica de produtos (GPS).

Se for requerida uma relação particular entre tamanho e forma, tamanho e orientação ou tamanho e posição, tal deve ser especificado no desenho.

A norma ISO 8015 especifica **regras** para a indicação de especificações GPS ISO gerais, por omissão, ou de especificações GPS gerais, por omissão, alteradas, específicas do desenho, que permitem modificar uma especificação ISO GPS geral, por omissão, p. ex. o “Tamanho local entre dois pontos” para, p. ex. o requisito de envolvente, através da inscrição da indicação “Tamanho ISO 14405  $\textcircled{E}$ ”, no interior ou junto da legenda.

Esta norma especifica também **regras** para a indicação de especificações GPS especiais, que permitem adicionar informação complementar, por exemplo um modificador de especificação  $\textcircled{E}$  à especificação ISO de base, indicada individualmente num elemento geométrico do desenho, de modo a modificar o conjunto de operações definido por omissão, tal como, p. ex.:  $\varnothing 38 \pm 0,1 \textcircled{E}$ .

## 5.8 Referências

- [G1] – GEUS, D.; KILLMAIER, T.; WECKENMANN, A. – *Designation and interpretation of geometrical tolerances*. In HUMIENNY, Z. [et al.] – *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House, 2001, cap. 17. ISBN 83-912190-8-9.
- [H1] – HENZOLD, G. – *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. 2ª ed. U.K.: Butterworth-Heinemann, 2006, cap. 17. ISBN 978-0-7506-67388.
- [S1] – SCHNEIDER, F. – *Tolérancement Géométrique: Interprétation*. IUFM de Lorraine. Metz: Université de Metz. 2005. 106 p.

### 5.8.1 Normalização

ASME Y14.5:2009	– Dimensioning and tolerancing. ASME.
DIN 7167:1987	– Relationship between tolerances of size, form, and parallelism; envelope requirement without individual indication on the drawing (anulada em 2010, com a entrada em vigor da DIN EN ISO 14405-1). DIN.
DIN 7168-2:1986	– General tolerances – Form and position. DIN (anulada em 1991).
ISO 1:2002	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Standard reference temperature for geometrical product specification and verification. ISO.
ISO/DIS 1101.2:2015	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
ISO 1101:2012 + Cor.1:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
ISO 1302:2002	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation. ISO.

ISO 4292:1985	– Methods for the assessment of departure from roundness – Measurement by two- and three-point methods. ISO (anulada em 2012).
ISO 5459:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum systems. ISO.
ISO 8015:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals – Concepts, principles and rules. ISO.
ISO 8015:1985	– Technical drawings – Fundamental tolerancing principle. ISO (anulada em 2011).
ISO 10579:2010 + Cor 1:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensioning and tolerancing – Non-rigid parts. ISO.
ISO 13715:2000	– Technical drawings – Edges of undefined shape – Vocabulary and indications. ISO.
ISO 14405-1:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 1: Linear sizes. ISO.
ISO/FDIS 14405-3:2016	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 1: Angular sizes. ISO.
ISO 14660-2:1999	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical features – Part 2: Extracted median line of a cylinder and cone, extracted median surface, local size of an extracted feature. (anulada e substituída pela ISO 17450-3) ISO
ISO 17450-2:2012	– Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 2: Basic tenets, specifications, operators, uncertainties and ambiguities. ISO.
ISO 17450-3:2016	– Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 3: Toleranced features. ISO.
ISO 14638:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Matrix model. ISO.
ISO/TR 14638:1995	– Geometrical product specification (GPS) – Masterplan. ISO.



# **CAPÍTULO 6**

## **Tolerâncias dimensionais**





artilharia, em 1765, embora se possam encontrar vários indícios da utilização de peças intermutáveis, ao longo dos tempos, cujas referências mais antigas parecem remontar ao século V a.C., na China.

O conceito de **intermutabilidade** (“*interchangeability*”) pode ser expresso como sendo “a aptidão de uma entidade para ser utilizada, sem modificações, em lugar de uma outra, para satisfazer os mesmos requisitos” (adaptado da NP EN 45020:2009). A concretização deste conceito só foi possível graças à combinação de um número significativo de inovações e melhorias registadas ao nível das várias operações mecânicas, traduzidas, por exemplo, no aparecimento de novas máquinas-ferramenta, dispositivos de fixação e montagem de peças, instrumentos de medição e controlo, etc.

A intermutabilidade das peças começou a ser utilizada, nos USA, nas indústrias do armamento e da relojoaria, por duas razões distintas. No armamento, em benefício dos utilizadores, pois as armas podiam ser reparadas, substituindo as peças danificadas, sem ter de se recorrer aos serviços de um técnico especializado. Na relojoaria, sobretudo em proveito dos fabricantes, uma vez que, como as peças semelhantes eram tão similares, a sua montagem apenas necessitava de pessoal não especializado [B3].

Este conceito não surgiu através dos desenhos técnicos, uma vez que, à época, estes ainda eram inadequados para esse fim, mas sim por via da utilização de calibres (“*gauges*”) e modelos de trabalho (“*templates*”). Porém, para produtos e objetos complexos e de grande envergadura, o fabrico daquelas ferramentas era dispendioso. Uma definição abstrata do objeto a produzir, sob forma escrita ou gráfica, é muito mais económica, desde que seja exaustiva, manuseável, fiel e constante [P2].

No entanto, até cerca de 1850, os desenhos técnicos não continham quaisquer dimensões [V1]. É pouco provável que as diferentes peças visíveis no desenho de conjunto da válvula de Trevithick, apresentado, a título de exemplo, na figura 6.2, tenham sido desenhadas em separado.

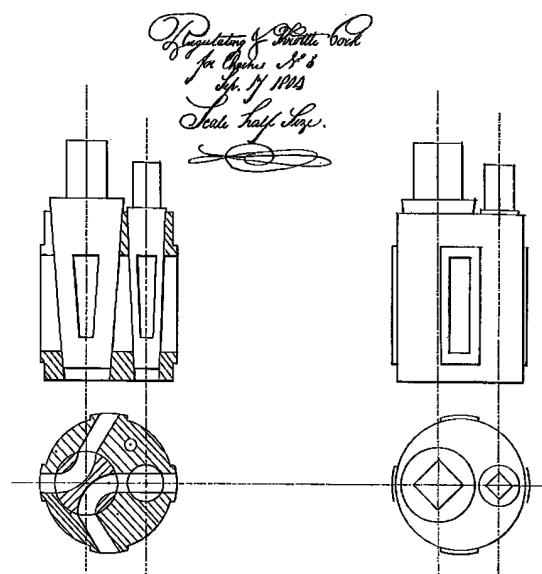


Figura 6.2 – Exemplo de desenho técnico de uma válvula (elaborado por Richard Trevithick, para a locomotiva Newcastle, 1804, e existente no Museu da Ciência, Londres) [B3]

Uma vez que a totalidade da válvula era produzida pelo mesmo trabalhador, apenas era necessário um único desenho do conjunto sem a indicação de quaisquer dimensões, em termos de valores inscritos (cotas). As dimensões principais eram então medidas diretamente no desenho e as peças construídas eram acabadas de modo a ficarem ajustadas adequadamente. Se fosse necessário produzir um número significativo destas válvulas, construindo os seus corpos e os seus machos cónicos em separado, previamente deviam ser feitos os calibres necessários ao controlo destas peças. O trabalhador que construía os corpos das válvulas tentava ajustar um calibre tampão aos respetivos furos cónicos, enquanto o operário que fazia os machos cónicos tentava ajustá-los a um calibre de anel [B3].

A partir da segunda metade do século XIX, a produção em massa de instrumentos de medição de boa exatidão (régua graduada, paquímetros, micrómetros, etc.) e o desenvolvimento da metrologia começaram a permitir a realização de operações de medição rigorosa, ao nível oficial, a custos aceitáveis. Logo, as peças representadas nos desenhos puderam passar a ser mais bem definidas, através da inscrição dos valores das dimensões lineares e angulares diretamente nos desenhos (ver exemplo na figura 6.3) [B3, V1].

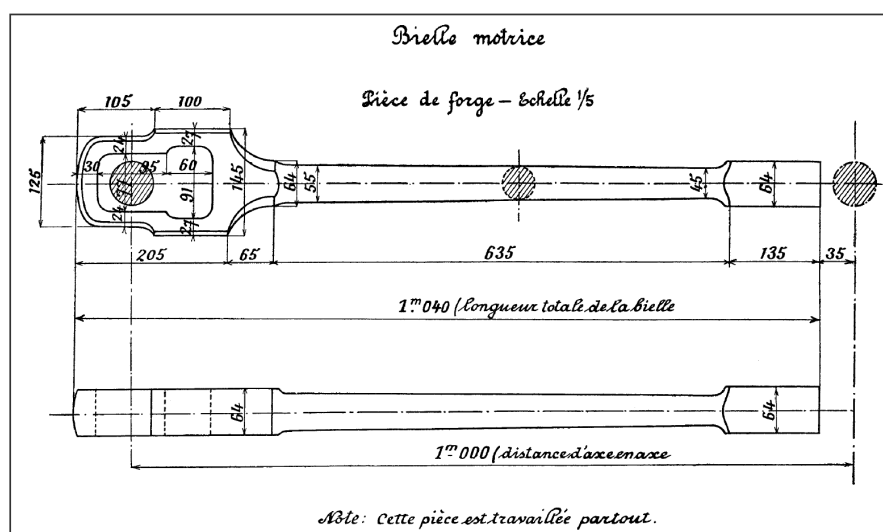


Figura 6.3 – Exemplo de um desenho técnico de uma biela, do início do século XX [D3, S1]

As indicações de tolerâncias começaram a aparecer nos desenhos, nos finais do século XIX, para especificar os desvios limites em relação à configuração nominal das peças, que continuavam a assegurar a sua montagem, e para permitir ultrapassar os problemas surgidos com a produção em massa e o desenvolvimento do “outsourcing” (contratação externa) [H1 e V1]. À medida que foram sendo concebidas máquinas, mecanismos e peças menos familiares aos operários, as diferentes peças principiaram a ser definidas individualmente, com a utilização de termos, tais como “ajustamento rotativo”, “ajustamento deslizante”, “ajustamento apertado”, etc., associados às dimensões nominais. As forças armadas dos países industrializados, grandes consumidores de produtos de engenharia sem capacidades de produção próprias, deram um grande impulso ao desenvolvimento destes domínios tecnológicos, sobretudo em resultado da experiência adquirida durante a Primeira Guerra Mundial (1914-18) [B3].

Em resumo, a necessidade de especificação de **tolerâncias dimensionais** em peças obtidas por trabalho mecânico surgiu, sobretudo, em resultado da introdução do requisito de intermutabilidade entre peças produzidas em série e da inerente inexatidão dos métodos de fabricação, associadas ao facto da “exatidão” dimensional ter sido considerada desnecessária na maioria das peças. Os dois elementos de uma ligação simples podem ser executados em série, separadamente, e ligados sem pré-escolha dos exemplares retirados de cada um dos lotes das peças a conjugar. Este processo de fabricação é designado por **método de fabricação em série** (ver figura 6.4).

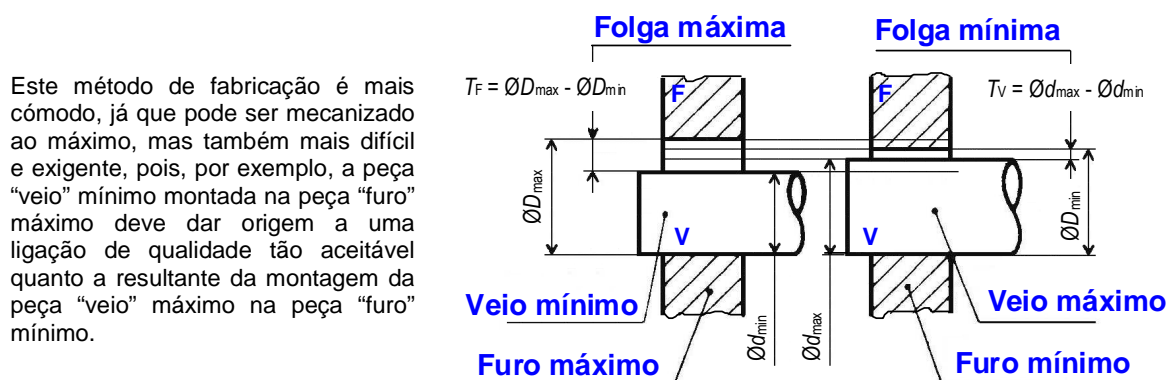


Figura 6.4 – Exemplo do método de fabricação em série. Adaptada de [C1]

Neste método, para que a função de **ajustamento** – “relação entre um elemento de tamanho exterior (o “**veio**”) e um elemento de tamanho interior (o “**furo**”), do mesmo tipo e de peças diferentes, que se destinam a ser montados” – possa ser satisfeita, foi considerado suficiente produzir uma dada peça de modo que os “tamanhos” (ver secção 6.2.1) dos seus elementos “furo” ( $\varnothing D$ ) ou “veio” ( $\varnothing d$ ) estejam dentro de dois limites admissíveis (figura 6.4), isto é, dentro da **tolerância** ( $T_F$  ou  $T_V$ ), que é “a variação de tamanho admissível na produção que assegura os requisitos de ajustamento funcional do produto”.

O desenho revelou-se, no contexto descrito, como o meio que permitiu multiplicar o número dos executantes de uma mesma peça e dos trabalhadores que fazem a preparação do trabalho das diferentes peças. Em conjunto com as máquinas-ferramenta, passou a ser um dos meios da massificação da produção, dos produtos e do trabalho [P2].

Os métodos modernos de cotação e toleranciamento estão muito ligados ao requisito de intermutabilidade. No entanto, este ponto de vista é desnecessariamente restritivo e surgiu mais devido à evolução dos acontecimentos do que de um ponto de vista racional e objetivo. A cotação e o toleranciamento sistemáticos são necessários em qualquer situação onde a conceção e a fabricação estejam completamente separadas, de modo que as peças possam ser produzidas a partir da informação dada nos desenhos e montadas sem a necessidade de qualquer operação de ajustagem ou de algo de parecido, realizada por um técnico especializado [B3].

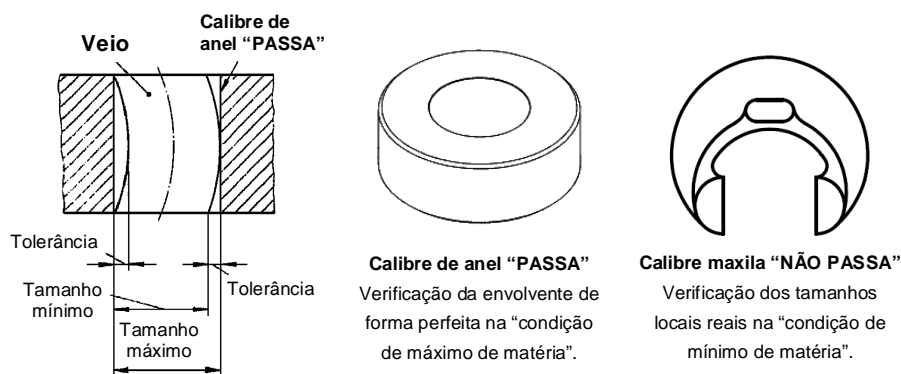
A necessidade de racionalizar a organização da produção das empresas e de fazer face ao “*outsourcing*” de tarefas produtivas que então se começava a desenvolver, com vista à obtenção de

evidentes vantagens econômicas, exigiu que o desenho técnico fosse o objeto de trabalhos de normalização relevantes, desenvolvidos ainda na primeira metade do século XX.

Alguns dos primeiros sistemas formais de tolerâncias para “furos” e “veios” foram concebidos por diversas organizações industriais, com vista a permitir satisfazer os seus próprios requisitos. Entre os sistemas mais importantes merecem destaque o da empresa Ludwig Loewe & Co. A.G., “*A fit classification system for machine tool engineering*”, desenvolvido por Georg Schlesinger (1874-1949), em 1903-04, na Alemanha, o de Carl Johansson (1864-1943), no domínio dos calibres e blocos-padrão, denominado “*Gauge with progressive tolerances*” e patenteado em 1907, na Suécia, e o de John Newall, “*Standard Tables of Limits*”, publicado em 1902, na Grã-Bretanha [B1, A2 e A1].

Em 1905, o inglês William Taylor (1865-1937), da empresa Taylor and Hobson, em Leicester, apresentou um pedido de patente no domínio do “controlo de roscas por meio de calibres”. A característica essencial dessa patente era que os calibres “PASSA” deviam ter uma “forma completa” para desse modo controlar, em simultâneo, todos os elementos da rosca na “condição de máximo de matéria”, enquanto os calibres “NÃO PASSA” deviam ser utilizados, em separado, nos diferentes elementos da rosca na “condição de mínimo de matéria”. Este princípio foi, em seguida, generalizado aos calibres de limites para peças lisas (ver figura 6.5). O termo “Princípio de Taylor” só passou a ser utilizado, de modo generalizado, a partir a Segunda Guerra Mundial [A1 e NF E 02-200], sendo atualmente designado por “requisito de envolvente” (ISO 14405-1).

#### Exemplo de verificação dimensional de uma peça “veio”:



#### Exemplo de verificação dimensional de uma peça “furo”:

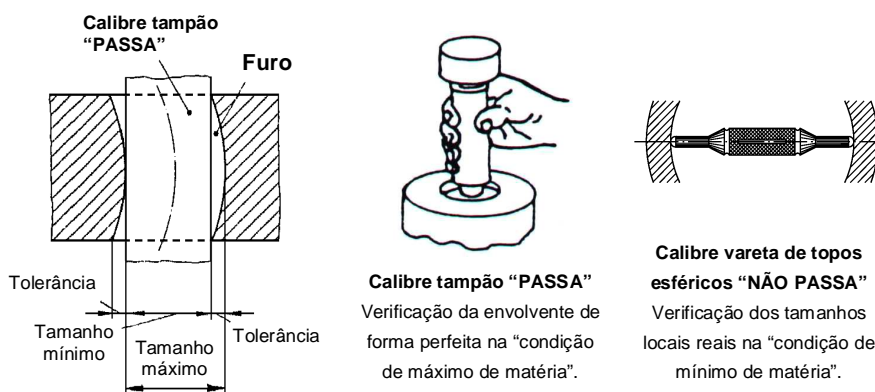


Figura 6.5 – Exemplos de verificação dimensional respeitando o “Princípio de Taylor”

Ao nível das primeiras normas nacionais, merece referência o sistema britânico estabelecido pela norma BS 164 – “*Limits and Fits for Engineering*” que foi publicada pela primeira vez em 1906, revista em 1924 e 1941, complementada pela norma BS 169:1941 – “*Limit Gauge Tolerance Systems*”, tendo sido anulada após a publicação da BS 1916, em 1953, que adotou o sistema ISA, quer em unidades do sistema métrico quer em polegadas. Por sua vez, a Associação Americana de Normalização (ASA – “*American Standards Association*”) estabeleceu também o seu sistema de tolerâncias, com a publicação, em 1925, da norma ASA B4a – “*Tolerances, Allowances and Gages for Metal Fits*”, que sofreu uma revisão em 1947 e foi utilizada, em maior ou menor grau, durante muitos anos [A1 e J1].

Uma primeira tentativa de unificação de vários sistemas nacionais de tolerâncias e ajustamentos, a nível internacional, foi feita no âmbito da “*International Federation of the National Standardizing Associations*” (ISA), primeiro em Nova Iorque, em 1926, e mais tarde em Praga, em 1928, com a criação do Comité técnico TC 3 – “*Limits and fits*”, animado pela Alemanha, França e Suécia. Os trabalhos desenvolvidos deram origem a um primeiro relatório, em 1931, a um projeto de relatório final, em 1935, e à aprovação do Boletim ISA 25 – “*The ISA tolerance system*”, em 1941, publicado em Basileia, em 1942, ano em que a ISA cessou também as suas atividades [A1, C6 e K4].

A publicação do Boletim ISA 25 veio dar resposta aos desenvolvimentos verificados na indústria e no comércio internacional, permitindo uma organização económica da produção através da utilização de ferramentas de corte (p. ex. mandris) e instrumentos de verificação (p. ex. calibres de limites) normalizados internacionalmente, em concordância com essa recomendação (ver figura 6.6).

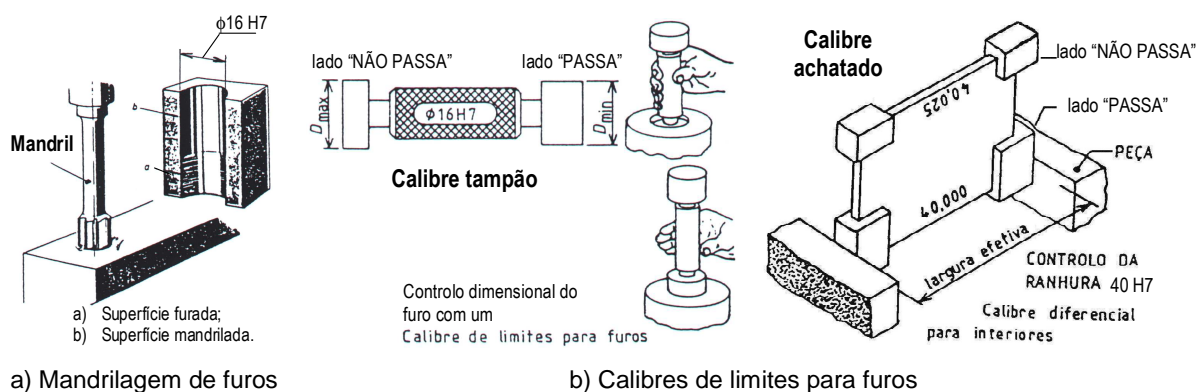


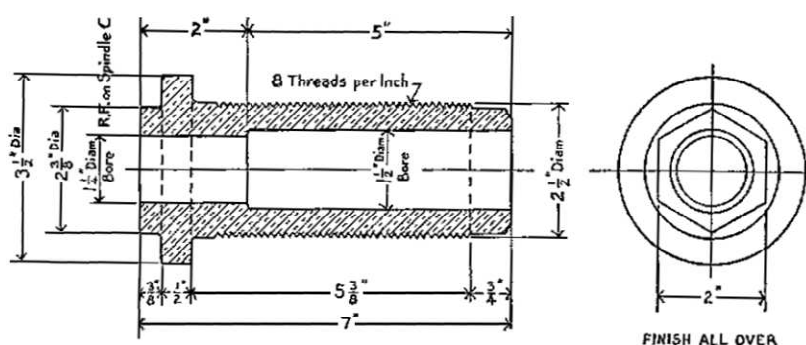
Figura 6.6 – Exemplos de normalização de ferramentas de corte e de instrumentos de verificação

Os princípios gerais de cotação e de indicação de tolerâncias, aplicáveis aos desenhos técnicos, começaram a ser objeto de normalização, no período entre as duas guerras mundiais. Em França, por exemplo, ainda antes do fim da primeira guerra, na Peugeot, as tolerâncias principiaram a ser introduzidas generalizadamente nos desenhos, de modo a permitir pôr em prática o sistema de “tolerâncias Peugeot” [C4]. As tolerâncias eram codificadas e classificadas segundo a sua natureza e as peças sujeitas à sua aplicação eram normalizadas de acordo com o tipo de elemento toleranciado. Foram também instituídos princípios rigorosos para o estabelecimento de desenhos de execução que daí em diante passaram a ser portadores de tolerâncias. No entanto, ao nível da indústria francesa,

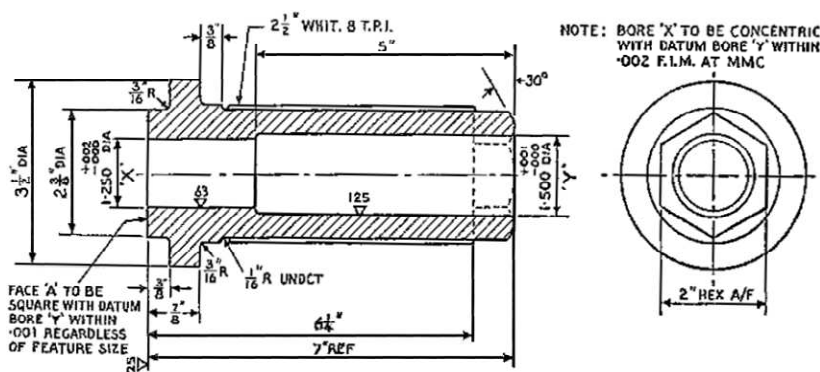


em geral, Deforge [D1] data de 1935 os primeiros desenhos industriais que foram cotados com tolerâncias. Em termos das primeiras normas nacionais neste domínio, podem referir-se as normas DIN 406-1 a -3, de 1922, BS 308:1927 – “*Engineering drawing office practice*” e ASA Z 14.1:1935 – “*Drawings and Drafting Room Practice*”, com 18 páginas, que dedicava apenas cinco à temática da “cotagem” e só dois parágrafos à do “toleranciamento” [K2, S5].

Na figura 6.7, apresenta-se um exemplo da evolução da indicação de tolerâncias em desenhos de engenharia canadenses, registrada na primeira metade do século XX. No desenho da figura 6.7 a), todas as dimensões estão indicadas só pelo seu valor nominal, registrando-se apenas a inscrição da nota “1 ¼ in. Diam. Bore R.F. on spindle C” [furo de diâm. 1 ¼ ” para ajustamento rotativo (“*running fit*”) com o veio C]. Na figura 6.7 b), o mesmo desenho, realizado segundo regras de cotação e toleranciamento posteriores, já apresenta indicações diretas de tolerâncias para os diâmetros dos dois furos e inclui, adicionalmente, duas notas com indicações sobre características geométricas a respeitar na fabricação [B3].



a) Desenho original, em 1920



b) Desenho refeito, em 1956, de acordo com a norma canadiana então em vigor

Figura 6.7 – Exemplo da evolução da indicação de tolerâncias nos desenhos de engenharia. Adaptada de [B3]

As dificuldades sentidas, no campo da cooperação técnica e militar, pelos Países Aliados, no decurso da Segunda Guerra Mundial (1939-45), puseram em evidência a necessidade de se caminhar decididamente para a Normalização no plano internacional. Com este objetivo, ainda em 1944, os USA e o Reino Unido impulsionaram a criação do UNSCC – “*United Nations Standards Coordinating Committee*”.

Depois da guerra, a criação de um sistema internacional de tolerâncias foi um dos temas discutidos na “*Canadian Conference on the Unification of Engineering Standards*”, realizada em Otava, em 1945, com a participação de delegados dos USA, Reino Unido e Canadá. Das várias reuniões ABC (“*America, Britain, Canada*”), realizadas posteriormente, resultou o projeto de um “*ABC System of Limits and Fits*”, publicado como ASA B4/30. Trabalhos complementares, desenvolvidos em reuniões ABC realizadas até 1962, permitiram a elaboração de uma nova proposta que foi aprovada, em 1966, mas que acabou por não ser publicada como norma. No entanto, após nova revisão, este documento deu origem à norma americana USAS B4.1:1967 – “*Preferred Limits and Fits for Cylindrical Parts*”, atual norma ASME B4.1:1967 (R2009), com todas as dimensões em polegadas, (ver ASME B4.1)

A criação da ISO – “*International Organization for Standardization*”, em 1947, com sede em Genebra, a partir da união da ISA (federação de países que privilegiavam a utilização de unidades do sistema métrico) e do UNSCC (comité de países que tinham a polegada como unidade de medida), com vista a facilitar a coordenação e a unificação internacionais das normas industriais, recuperou muito do trabalho normativo que tinha sido desenvolvido pela ISA, nomeadamente no domínio das tolerâncias dimensionais [K3]. Os trabalhos desenvolvidos pelo Comité técnico ISO/TC 3 – “*Limits and fits*”, baseados no Boletim ISA 25, deram origem à atual série de normas ISO 286:2010 (2ª ed.), publicada pela primeira vez em 1962, sob a forma de recomendação (ISO/R 286), que fornece o sistema de codificação ISO para tolerâncias e desvios em tamanhos lineares de elementos de tamanho (“*features of size*”), do tipo cilindro e do tipo “duas superfícies planas paralelas opostas” (ver exemplos na figura 6.6).

Em Portugal, o Boletim ISA 25 serviu também de base à elaboração de um conjunto de normas portuguesas sobre o “Sistema de tolerâncias dimensionais”, ao longo da década de 60 do século XX (NP 107:1962, NP 189:1962, NP 190:1963, NP 257:1961, NP 258:1961 e NP I 1040:1970). A generalidade destas normas foi substituída pela adoção obrigatória das normas europeias EN 20286-1 e -2 de 1993, atuais EN ISO 286-1 e -2 de 2010.

A nível internacional, as regras para a indicação de tolerâncias para dimensões lineares e angulares em desenhos técnicos só foram estabelecidas, em 1964, através da recomendação ISO/R 406, que serviu também de base à elaboração da norma portuguesa NP 406:1966, tendo sido posteriormente editada como norma ISO 406:1982 e sofrido uma revisão em 1987, estando atualmente englobadas na norma ISO 129-1 que especifica também os princípios gerais de cotação.

Em termos gerais, as unidades de uma dimensão devem ser especificadas em conjunto com essa dimensão. A unidade de medida predominante, num desenho, poderá ser especificada no desenho (no interior ou junto da legenda) ou num documento associado, podendo ser omissa das dimensões individuais. As dimensões expressas numa unidade de medida diferente devem mencionar essa unidade. Os desvios limites devem ser expressos na mesma unidade do valor dimensional (ver ISO/DIS 129-1.2).

De acordo com o domínio de aplicação, as **tolerâncias das dimensões lineares** podem ser indicadas de diferentes modos (ver figura 6.8). Por omissão, as unidades das dimensões lineares e desvios limites ou limites de tolerância associados, inscritos nos desenhos, são expressas em **mm**. Estas unidades não se indicam nos desenhos, estão implícitas (ver norma ISO 14405-2).

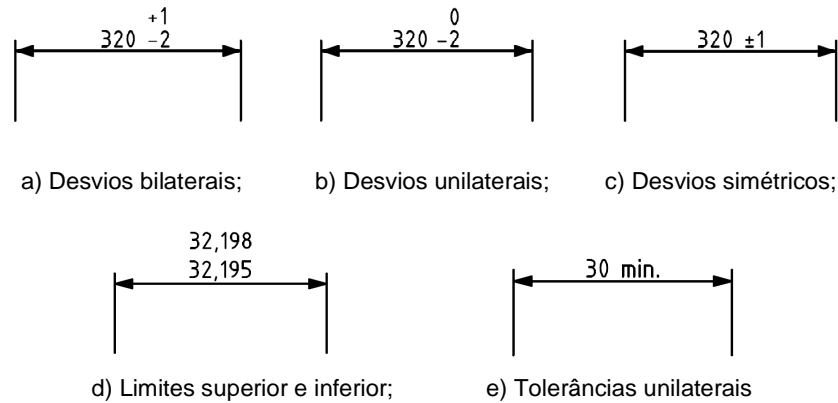


Figura 6.8 – Exemplos de indicações de tolerâncias de dimensões lineares (ISO 129-1)

Nas **dimensões angulares**, as unidades para o valor nominal e para os valores dos desvios limites ou limites de tolerância devem ser sempre indicadas (ver figura 6.9). Se o valor dimensional angular ou o desvio limite angular for expresso em minutos de grau ou em segundos de minuto de grau, o valor dos minutos ou dos segundos deverá ser precedido por 0° ou 0° 0', conforme aplicável.

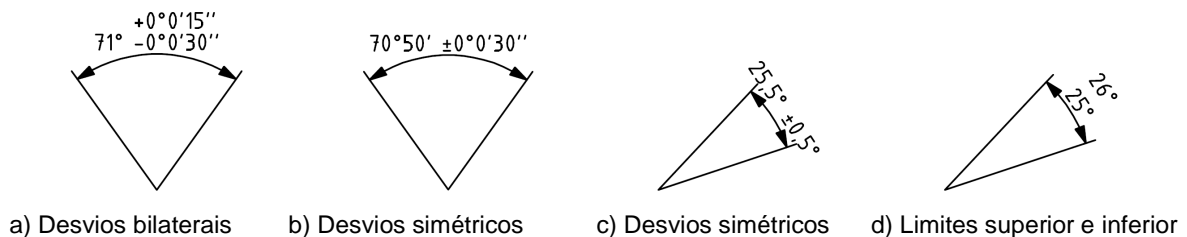


Figura 6.9 – Exemplos de indicações de tolerâncias de dimensões angulares (ISO 129-1)

Por omissão, a unidade utilizada é o **grau (°)**, podendo ser utilizados graus subdivididos decimalmente ou graus, minutos e segundos. Se for utilizada uma unidade diferente das usadas por omissão, essa unidade deve ser indicada no interior ou junto da legenda do desenho (ver norma ISO 14405-2).

A investigação histórica mostra que, como regra geral, as **tolerâncias dimensionais** (de diâmetros, distâncias entre duas superfícies planas paralelas opostas, etc.) têm vindo a ser reduzidas, em média, cerca de 10 vezes, ao longo de cada período de 50 anos, e esta “lei de redução” pode ser estendida a mais de 200 anos para atrás (ver figura 6.10). No futuro, provavelmente, esta tendência não sofrerá alteração – pelo contrário. Os métodos de produção e de processamento, presentes e futuros, podem controlar essas tolerâncias dimensionais, bem como as medições requeridas – durante e após a produção – que são necessárias para a obtenção de tolerâncias cada vez mais pequenas [B5].

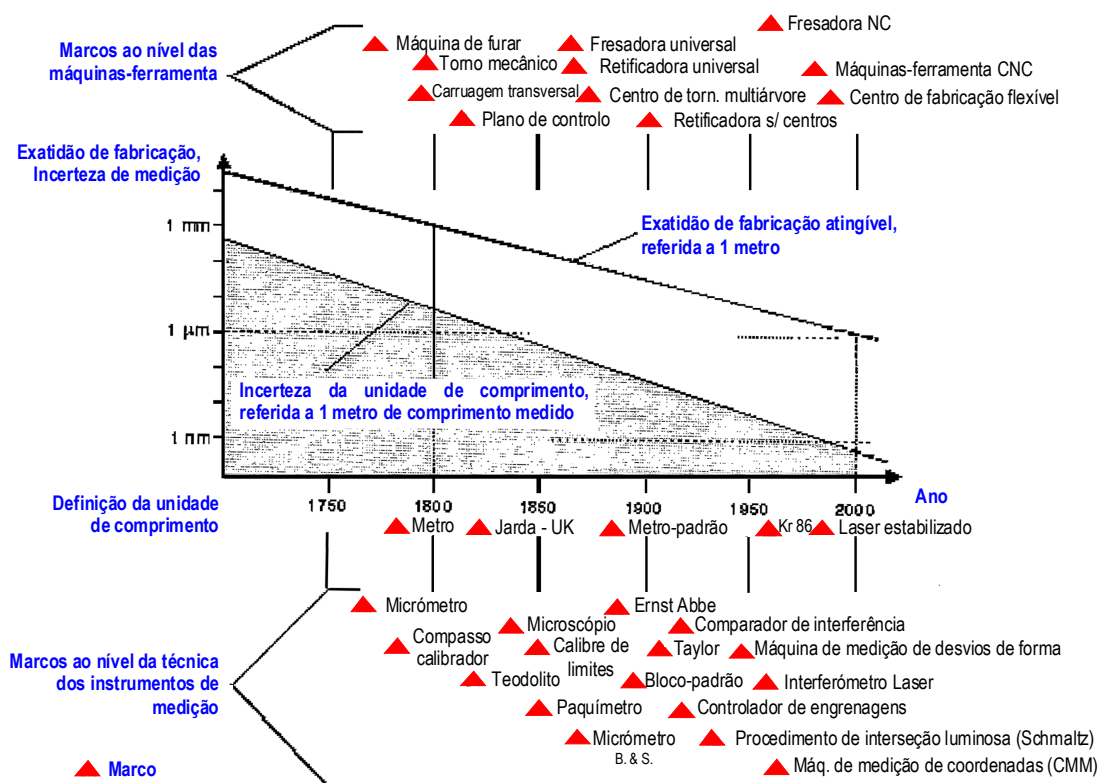


Figura 6.10 – Evolução da exatidão de fabricação e da incerteza da unidade “metro”. Adaptada de [W1 e G2]

Por sua vez, **outras características geométricas**, tais como forma, orientação, posição e batimento (ver norma ISO 1101) e as características do estado de superfície (ondulação e rugosidade) (ver norma ISO 1302) são um problema completamente diferente. Essas características geométricas não podem ser controladas durante o processo de fabricação, porque dependem, geralmente, de parâmetros que também não podem ser controlados durante o mesmo. Muitas vezes, é a escolha e a ordem dos processos e a escolha das matérias constituintes que acabam por ter uma influência decisiva [B5].

Até às primeiras décadas do século XX, as capacidades das máquinas-ferramenta eram tais que se tornava relativamente fácil produzir peças que podiam ser consideradas “geometricamente perfeitas”, quando se comparavam as suas características geométricas com as correspondentes magnitudes das tolerâncias de trabalho a que estavam sujeitas as suas dimensões inscritas nos desenhos.

**Atualmente, os desvios geométricos resultantes do processo produtivo podem ser relativamente maiores do que os correspondentes desvios dimensionais**, sendo essa diferença maior do que a verificada antes – os desvios podem ser, de facto, de tal ordem que dificultem a função da peça, bem como a cotação e o toleranciamento dimensionais (ver figura 6.11). Os **desvios geométricos de forma** (retitude, planeza, circularidade, cilindridade, etc.) devem, pois, ser limitados num grau maior do que no passado, por meio de tolerâncias, de modo a garantir-se a correta função da peça e a relevância da cotação e toleranciamento dimensionais [B5, N1 e N2].

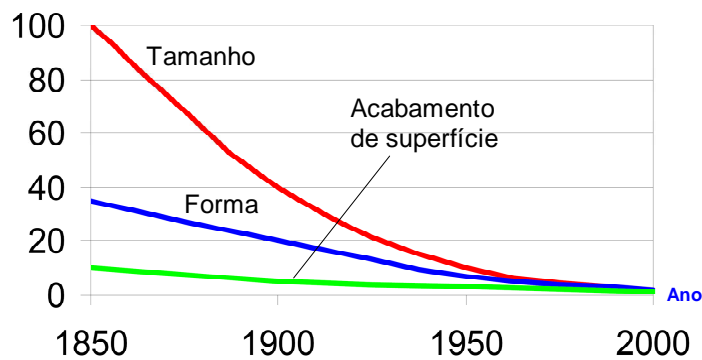


Figura 6.11 – Evolução relativa das inexactidões das diferentes características. Adaptada de [N2]

Deve assinalar-se o facto de ter havido uma mudança de posição assinalável entre desvios dimensionais e desvios geométricos de forma, orientação, posição e batimento. **A anterior geração de normas ISO de cotação e toleranciamento dimensionais trabalhava apenas com peças teoricamente corretas – como se não ocorressem desvios de forma e angulares –** daí resultando desenhos que não especificavam de uma maneira suficientemente precisa o que devia ser requerido à geometria, de modo a obter-se a função desejada (ver exemplo na figura 6.12). As normas mais recentes pretendem dar resposta às novas necessidades decorrentes do desenvolvimento tecnológico [B5].

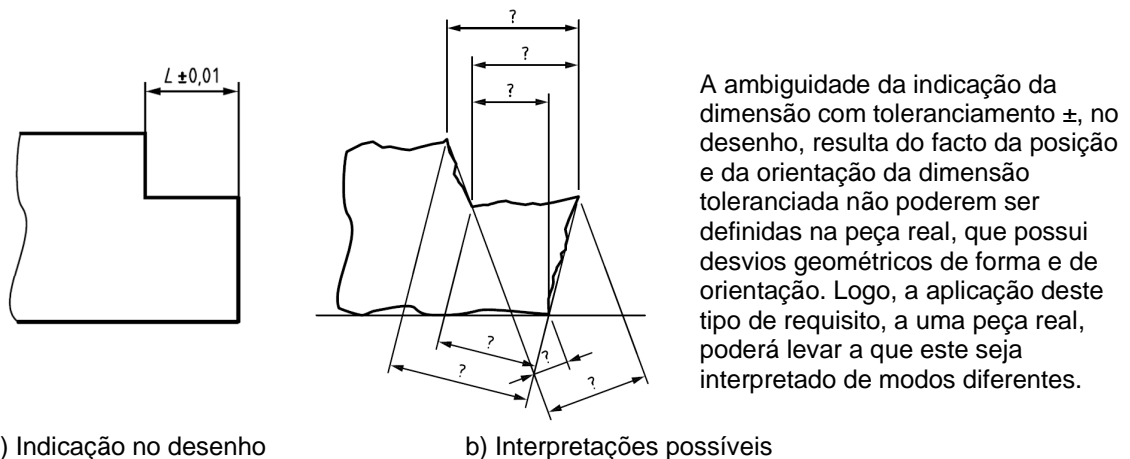


Figura 6.12 – Exemplo da ambiguidade resultante da utilização do toleranciamento dimensional (ISO 14405-2)

A especificação do tamanho linear, adequado a um determinado elemento de tamanho, comporta, muitas vezes, uma **ambiguidade de descrição da função** e uma **ambiguidade de especificação** significativas (como no caso do toleranciamento do diâmetro de um cilindro).

Por exemplo, quando se utilizam máquinas de medição de coordenadas (CMM), o resultado da medição do diâmetro de uma peça não exatamente cilíndrica (ver figura 6.13) pode depender de várias condições de influência, tais como o diâmetro do apalpador, o número de pontos extraídos, o filtro utilizado e o algoritmo de cálculo que, muito raramente, são especificadas no desenho de uma peça.

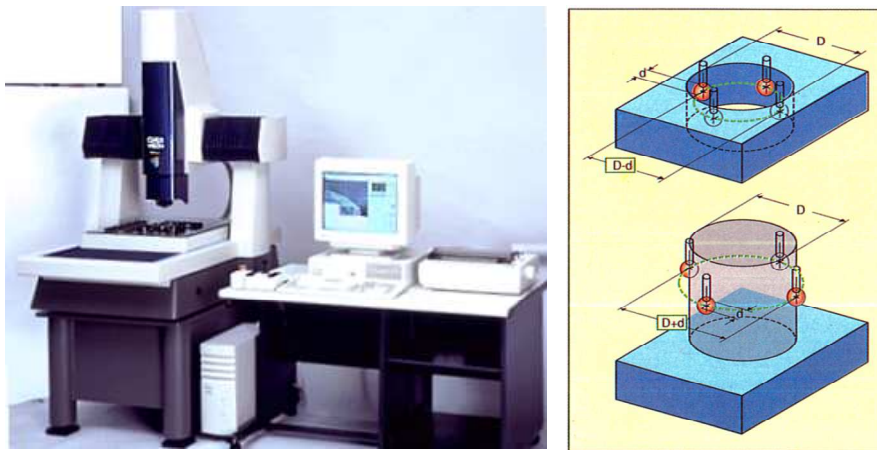


Figura 6.13 – Exemplo de medição de diâmetros de cilindros com uma máquina de medição de coordenadas (CMM)

Se tais condições não estiverem estabelecidas no desenho ou em normas, a especificação será incerta e terá uma grande **ambiguidade de especificação**. No entanto, mesmo que as especificações sejam muito completas, se a função não for caracterizada através de especificações conformes com a realidade, as especificações terão uma má correlação com a função pretendida e daí resultará uma **ambiguidade da descrição da função** [D2].

Os diâmetros toleranciados das diversas peças podem ser utilizados numa **grande variedade de funções** (ver figura 6.14), tais como: corpos rolantes, ajustamentos com e sem folga, chumaceiras hidrodinâmicas, rolamentos, etc. Por sua vez, a **matéria da peça** (que pode ser rígida, flexível ou permanentemente deformável) pode também ter um impacto na função.

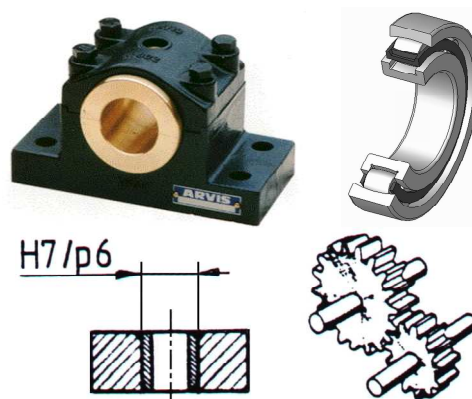


Figura 6.14 – Peças cilíndricas com diferentes funções

Com a anterior geração de normas (algumas ainda em utilização) há poucas possibilidades de indicar qual o tipo de função que o elemento deverá preencher ou de indicar uma especificação mais detalhada (por exemplo, qual o algoritmo a usar no cálculo do diâmetro?). Logo, em muitos casos, poderá também estar presente uma **ambiguidade da descrição da função**, que poderá ser muito significativa.

Nas secções seguintes deste texto, abordam-se alguns dos temas fundamentais relativos ao toleranciamento de dimensões. Começa-se por apresentar os conceitos de base sobre o atual toleranciamento dimensional em desenhos de engenharia mecânica. Desenvolve-se o conceito de “elemento de tamanho” a partir do qual é definida a dimensão “tamanho”. Mencionam-se os diferentes tipos de “tamanhos lineares” atualmente postos à disposição dos projetistas e faz-se também uma descrição resumida do atual “Sistema ISO de tolerâncias e de ajustamentos”. Referem-se os novos tipos de “tamanhos angulares” em desenvolvimento, que estão a ser estruturados de um modo idêntico ao já adotado para os tamanhos lineares. Finalmente, identificam-se as limitações deste tipo de toleranciamento em dimensões que não sejam “tamanhos”, mostrando-se como a utilização alternativa de toleranciamento geométrico, pode evitar a **ambiguidade de especificação** resultante do uso do toleranciamento  $\pm$ .

## 6.2 Conceitos de base sobre o atual toleranciamento dimensional

O toleranciamento de dimensões foi, historicamente, o primeiro modo de toleranciamento utilizado para especificar os desvios admissíveis das características geométricas das peças, em relação às respetivas configurações nominais, que continuam a assegurar a sua funcionalidade.

Este toleranciamento, que utiliza dimensões com indicações dos desvios limites, valores limites de dimensões ou limites unilaterais de dimensões (ver exemplos nas figuras 6.8 e 6.9), é atualmente designado por “**toleranciamento  $\pm$** ” (ver ISO 14405-2). O sinal  $\pm$  não deverá ser interpretado como se os desvios limites fossem sempre simétricos em relação ao tamanho nominal.

Em diversos documentos normativos, o termo “**dimensão**” é objeto de definições diferentes, umas mais restritas e outras mais latas, tais como:

- distância entre dois elementos ou o tamanho de um elemento de tamanho (ISO 129-1:2004). Uma dimensão designa-se por “**cota**” quando está inscrita num desenho (ISO 286-1:1988);
- valor numérico ou expressão matemática, em unidades de medida apropriadas, utilizado para definir a forma, o tamanho, orientação ou posição de uma peça ou de um elemento (ASME Y14.5:2009);
- designação comum para um número de diferentes subtipos de dimensões (características) geométricas do modelo nominal de uma peça real (ISO/DIS 14405-2.2:2010).

As dimensões são genericamente classificadas em dimensões lineares e dimensões angulares e cada uma delas pode ser dividida em vários tipos de dimensões, a generalidade das quais só pode ser definida inequivocamente em termos do modelo nominal da peça (ver quadros 6.1 e 6.2).

Quadro 6.1 – Tipos de dimensões lineares (ISO 14405-2)

Dimensão		Caracterização, tipo e número de elementos		Tipo de dimensão	Exemplos de cotação	
Dimen- são	Dimensão linear  (unidades de comprimento)	Um elemento	Integral – só elementos de tamanho (ver ISO 14405-1)	Tamanho linear		
			Integral ou derivado	Dimensão de raio num elemento integral		
				Dimensão de raio num elemento derivado		
			Integral ou derivado	Comprimento de arco integral		
				Comprimento de arco derivado		
		Dois elementos	Integral – Integral	Fazendo face no mesmo sentido	Distância linear ou altura de ressalto	
				Fazendo face em sentidos opostos	Distância linear	
			Integral – derivado	Distância linear		
			Derivado – derivado	Distância linear		
		Aresta (região de transição entre dois elementos integrais)	Integral	Forma de chanfro	Altura e ângulo de chanfro	
				Forma arredondada	Raio de aresta	

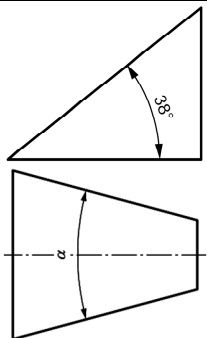
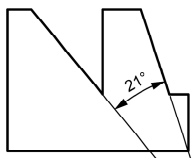

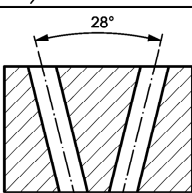
A especificação de tolerâncias  $\pm$  em quaisquer dimensões que não sejam “tamanhos” é um requisito ambíguo, uma vez que não pode ser definida de um modo inequívoco em peças reais. Não existe uma solução universal para a resolução deste tipo de ambiguidades que resultam da existência, nas



peças, de desvios geométricos de forma e angulares que, embora não sejam limitados através do toleranciamento dimensional, influenciam o resultado da avaliação das dimensões em causa.

Esta **ambiguidade de especificação** dá origem a que possa ser feita mais do que uma interpretação do requisito indicado num desenho ou modelo 3D (ver exemplo na figura 6.12). Qualquer uma dessas interpretações pode ser utilizada para provar a conformidade ou a não conformidade da peça com esse requisito. Como a ambiguidade da especificação dimensional, resultante da existência de desvios geométricos nas peças reais, não pode ser prevista e quantificada antecipadamente, na maioria dos casos funcionais, não será possível rejeitar peças que não funcionem.

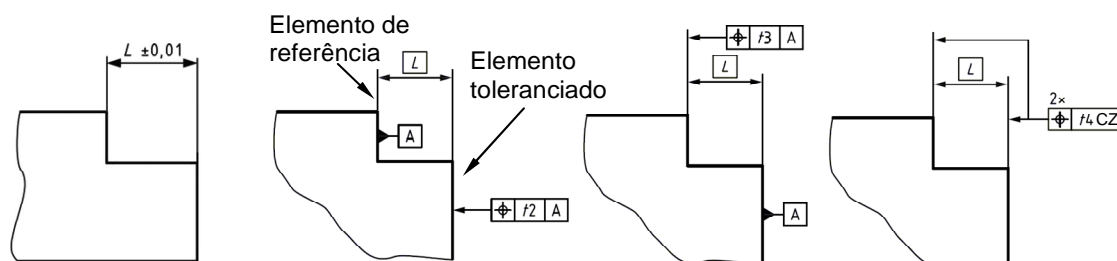
Quadro 6.2 – Tipos de dimensões angulares (ISO 14405-2)

Dimensão		Caracterização, tipo e número de elementos		Característica detalhada	Exemplos de cotação
Dimensão	Dimensão angular (unidades de ângulo)	Um elemento	Integral – só elementos de tamanho	Tamanho angular, (ISO 14405-3 e ISO 2538)  Cones (ISO 3040)	
		Dois elementos	Integral – Integral	Distância angular	
			Integral – derivado	Distância angular	
			Derivado – derivado	Distância angular	

A norma ISO 14405-2 define as condições de utilização de tolerâncias geométricas, em alternativa ao toleranciamento dimensional, com vista a evitar a ambiguidade resultante da utilização de tolerâncias  $\pm$  em dimensões lineares e angulares que não sejam tamanhos. Deste modo, nestes casos, a variabilidade dimensional pode ser especificada por meio de toleranciamento dimensional  $\pm$  ou através de toleranciamento geométrico.

Na figura 6.15, podem observar-se exemplos de alternativas de toleranciamento inequívocas e com pouca ou nenhuma **ambiguidade de especificação**, para o caso em apreço, baseadas em tolerâncias geométricas de localização (ver ISO 1101). O toleranciamento geométrico é uma

linguagem mais robusta, com uma gramática que permite o estabelecimento da referência especificada (ver ISO 5459) considerada mais adequada para a função. Neste caso, existem três possíveis soluções de especificação de tolerâncias. A solução correta será aquela que melhor emular a função pretendida para a peça (ver norma ISO 14405-2).



Exemplos de alternativas de toleranciamento inequívoco

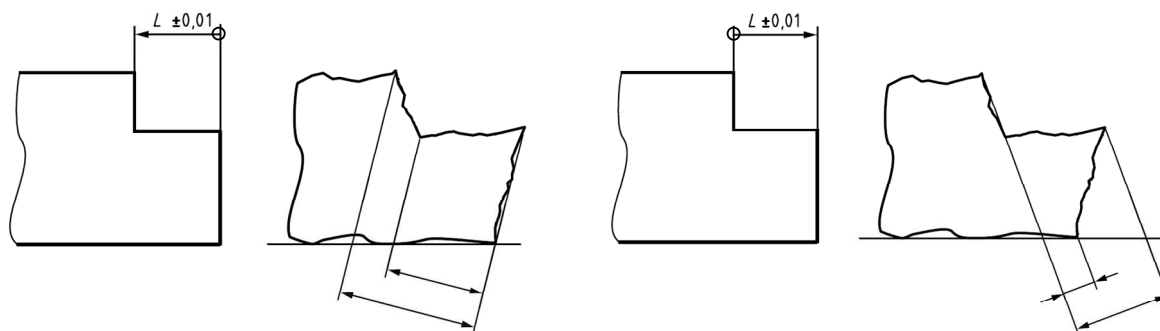
a) Toleranciamento  $\pm$ 

b) Toleranciamento geométrico

Figura 6.15 – Exemplos de interpretações da distância linear entre dois elementos integrais e de alternativas de especificação com toleranciamento geométrico (ISO 14405-2)

Em certos casos, tais como em ressaltos idênticos ao do exemplo em análise, a função (p. ex. de montagem) admite tolerâncias para a forma (p. ex. de planeza) maiores do que para a posição do ponto mais saliente da superfície material. Nestas circunstâncias e com determinados processos produtivos (p. ex. fundição, estampagem, trabalho de metais em chapa), a utilização de toleranciamento dimensional  $\pm$  pode ser suficiente, em termos técnicos, com inerentes vantagens económicas.

A utilização adicional do símbolo de origem  $\oplus$  numa das extremidades da linha de cota permite indicar qual o elemento que deverá ser usado como elemento de referência, na verificação da peça real, diminuindo assim a ambiguidade da especificação (ver exemplos na figura 6.16). As dimensões em relação à origem são consideradas a partir desse plano e definem os limites entre os quais se devem situar todos os pontos do outro elemento geométrico (ISO 129-1 e ASME Y14.5).



a) Indicação no desenho b) Interpretação na peça

c) Indicação no desenho d) Interpretação na peça

Figura 6.16 – Exemplos de dimensões de ressaltos com o símbolo de origem, em conformidade com a ISO 129-1

No entanto, este conceito não permite estabelecer elementos de referência tais como os especificados com o toleranciamento geométrico, nos exemplos da figura 6.15 b). Atualmente, atendendo a que o princípio de independência se aplica por omissão a todo o desenho, uma dimensão toleranciada controla apenas dimensões locais reais, não existindo qualquer controle da relação geométrica entre elementos individuais, só possível através de tolerâncias geométricas, conforme os exemplos apresentados na figura 6.15 b).

### 6.2.1 Definições gerais das dimensões “tamanho”

Em termos gerais, o conceito de “**tamanho**” [“*size*” (en) ou “*taille*” (fr)] é uma noção conveniente que toda a gente usa, mas o seu significado exato – quando existe algum – está quase sempre dependente do contexto e é muitas vezes subjetivo. A noção de tamanho geométrico atravessa as diversas indústrias mecânicas, sendo utilizada, por exemplo, na organização e caracterização de ferramentas de corte, na catalogação de componentes normalizados, etc. [V2].

No âmbito da atual “Especificação geométrica de produtos”, o “tamanho” é definido indiretamente através dos designados “**elementos de tamanho**” (“*features of size*”) que são classificados em “elementos de tamanho linear” e “elementos de tamanho angular” (ISO 17450-1).

De acordo com a norma ISO 14405-1, um “**tamanho**” é um parâmetro dimensional (característica intrínseca, ver secção 4.4.1) considerado variável para um elemento de tamanho, que pode ser definido num elemento nominal ou num elemento associado. Um tamanho é linear ou angular. Por sua vez, uma “**característica de tamanho**” é uma característica relativa a um tamanho e definida num elemento integral extraído. Um tamanho pode ser avaliado através de mais do que uma característica de tamanho (p. ex. o diâmetro entre dois pontos ou o diâmetro do elemento associado, definido no elemento extraído).

#### 6.2.1.1 Elementos de tamanho linear

Um “**elemento de tamanho linear**” é um elemento geométrico que possui uma ou várias características intrínsecas, das quais apenas uma poderá ser considerada como um parâmetro variável, e que, complementarmente, é membro de uma “família monoparamétrica” e obedece à “propriedade de contenção monotónica”, para esse parâmetro (ISO 17450-1).

Um elemento de tamanho linear pode ser um cilindro, dois planos paralelos opostos, uma esfera, um toro, uma circunferência, duas linhas retas paralelas opostas, duas circunferências opostas, etc. (ver exemplos na figura 6.17). Existem restrições a considerar, se houver mais do que uma característica intrínseca (como, p. ex., no caso do toro).

Um tamanho linear corresponde, por exemplo, ao diâmetro  $\varnothing d$  de um cilindro, à distância  $L$  entre dois planos paralelos opostos ou ao diâmetro  $S\varnothing d$  de uma esfera. As características intrínsecas são

consideradas **variáveis** se, para todos os seus possíveis valores, a classe de invariância do elemento considerado (ver quadro 4.5, da secção 4.3.2.1) não se alterar (como são os casos dos tamanhos  $\varnothing d$ ,  $L$ , e  $S\varnothing d$  dos elementos das figuras 6.17 a) a c), ou **fixas** se, para pelo menos um dos seus possíveis valores, a classe de invariância do elemento considerado se alterar [como é o caso da dimensão  $\varnothing D$  do diâmetro mediano (diretriz) do toro da figura 6.17 d), elemento que pertence à classe de invariância “de revolução” mas que, com  $\varnothing D = 0$ , se transforma numa esfera que pertence à classe de invariância “esférica”].

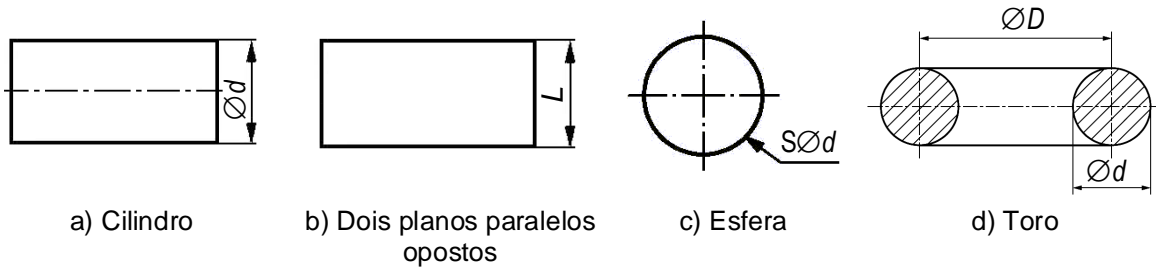


Figura 6.17 – Exemplos de elementos de tamanho linear e suas características intrínsecas

Uma “**família monoparamétrica**” (“*one-parameter family*”) é um conjunto de elementos geométricos ideais, definidos por um ou mais parâmetros dimensionais, cujos membros são gerados através da variação de apenas um dos parâmetros. Assim, por exemplo, um conjunto de blocos-padrão definidos através dos comprimentos dos blocos é uma família monoparamétrica.

A “**propriedade de contenção monotónica**” (“*monotonic containment property*”) é uma propriedade de uma “família monoparamétrica” em que um membro com um dado tamanho contém qualquer outro membro com um tamanho inferior.

Na figura 6.18, usa-se um toro (superfície toroidal) como exemplo de um elemento de tamanho. Um conjunto dos toros com o mesmo diâmetro mediano  $\varnothing D$  fixo e diferentes diâmetros  $\varnothing d$  da secção reta constitui uma “família monoparamétrica” [ver figura 6.18 a)]. Um toro pertencente a esta família respeita a propriedade de contenção monotónica, porque, de um ponto de vista ideal, o membro maior da família envolve completamente o membro mais pequeno [ver figura 6.18 b)].

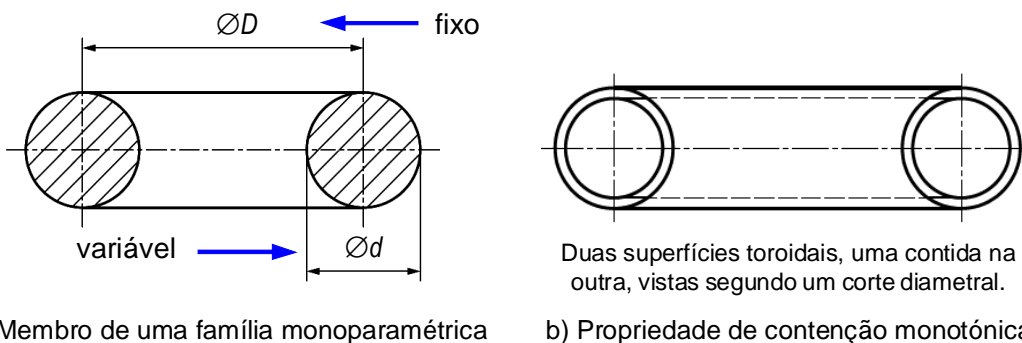


Figura 6.18 – Condições a satisfazer por um elemento de tamanho: o exemplo de um toro (ISO 22432)

Voelcker [V2] analisou várias concepções de “tamanho” e observou que as propriedades de contenção e de invariância da forma são importantes. A contenção é um princípio de base utilizado na concepção da montagem, sendo a variação de tamanho uma ferramenta poderosa no seu controlo. A invariância da forma é fundamental em aplicações em que a forma determina a função. As ligações cinemáticas entre pares de elementos, com contacto superficial (p. ex. um veio rodando num casquilho – o veio e o furo do casquilho deverão permanecer cilíndricos, quando sujeitos a pequenas variações diamétrais), são alguns dos exemplos onde estes conceitos são aplicados.

### 6.2.1.2 Elementos de tamanho angular

Um “**elemento de tamanho angular**” é um elemento geométrico que pertence à classe de invariância de revolução, cuja geratriz está inclinada nominalmente, em relação ao eixo de revolução, de um ângulo  $\alpha/2$  diferente de  $0^\circ$  ou  $90^\circ$ , ou pertence à classe de invariância prismática e é composto por duas superfícies com a mesma configuração que formam o ângulo  $\beta$  entre os dois elementos de situação diferente de  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , (ISO 17450-1).

Um elemento de tamanho angular pode ser um cone, um tronco de cone, uma cunha (truncada ou não) e duas linhas retas opostas, nas superfícies de uma cunha ou na superfície de um cone (ver exemplos na figura 6.19).

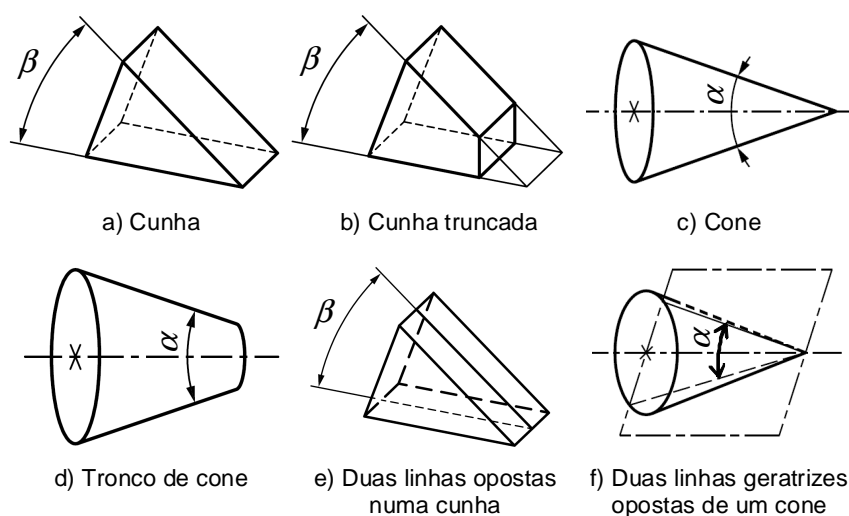


Figura 6.19 – Exemplos de elementos de tamanho angular e suas características intrínsecas (ISO/FDIS 14405-3)

Um elemento de tamanho angular existe quando a matéria é limitada pelos dois elementos em sentidos opostos (ISO/FDIS 14405-3). Um tamanho angular corresponde, por exemplo, ao ângulo  $\beta$  de uma cunha ou ao ângulo  $\alpha$  de um cone.

Nas definições anteriores de elementos de tamanho angular (cones e cunhas), as suas características intrínsecas (tamanhos), os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  (ver figura 6.19), eram consideradas, por omissão, fixas, uma vez que não eram contempladas quaisquer exceções para os seus valores (ver norma ISO 5459). Assim, por exemplo, um cone que pertence à classe de invariância “de revolução”,

se  $\alpha = 0$ , transformava-se numa linha reta e passava a pertencer à classe de invariância “cilíndrica”. Por sua vez, uma cunha pertencente à classe de invariância “prismática”, quando  $\beta = 0$ , transformava-se num plano e passava a pertencer à classe de invariância “plana”.

## 6.3 Tamanhos lineares

### 6.3.1 Generalidades

De acordo com o princípio de independência, por omissão, uma dimensão linear toleranciada, inscrita num desenho, limita apenas os tamanhos locais reais (tamanhos entre dois pontos opostos) de um elemento de tamanho, mas não os seus desvios de forma (ver figura 6.20).

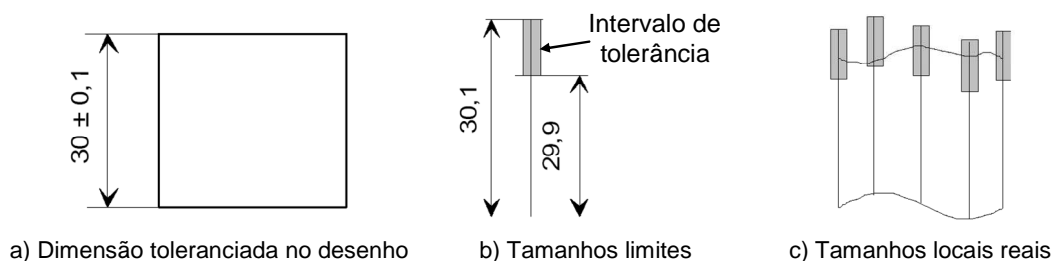


Figura 6.20 – Dimensão linear – sua interpretação por omissão. Adaptada de [S2]

Na figura 6.20, cada distância entre dois pontos opostos (tamanho) tem a sua dimensão limitada pelos valores 30,1 mm, no máximo, e 29,9 mm, no mínimo. Os desvios de forma (planeza) do elemento “duas superfícies planas paralelas opostas” não se encontram limitados. Só é possível limitar uma dimensão, unicamente, em termos do seu valor limite superior ou do seu valor limite inferior. Para que as especificações dimensionais, indicadas nos modelos nominais das peças, possam ser definidas de um modo inequívoco e interpretadas corretamente, nas peças reais (ou extraídas) que são geometricamente imperfeitas (ver figura 6.21), houve a necessidade de estabelecer um conjunto de definições adicionais.

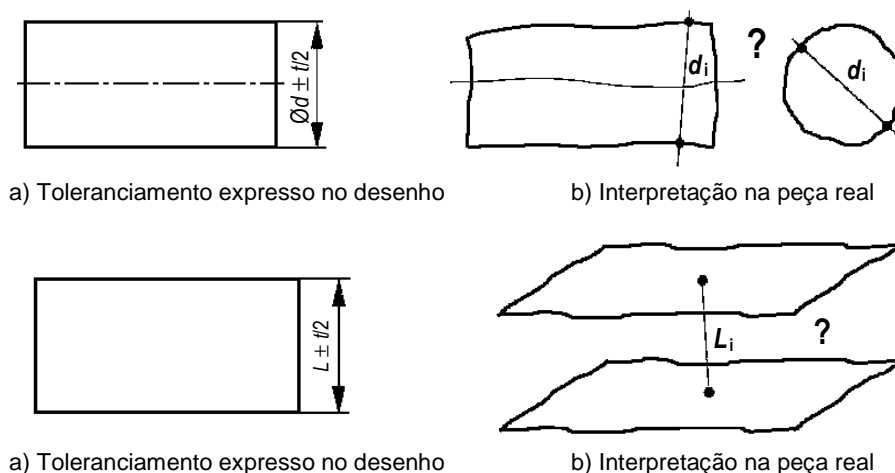


Figura 6.21 – Verificação ambígua das distâncias entre dois pontos opostos, nas superfícies reais de peças. Adaptada de [C2]

Na nova linguagem ISO, por omissão, uma dimensão linear toleranciada limita inequivocamente apenas os tamanhos definidos, em conformidade com a norma ISO 14660-2, entretanto substituída pela norma ISO 17450-3, por meio de procedimentos numéricos a implementar em máquinas de medição de coordenadas (tridimensionais) e em máquinas de medição de desvios de forma (bidimensionais):

- a) O “**diâmetro local de um cilindro extraído**” é a distância entre dois pontos opostos no elemento, em que a linha de conexão entre os pontos (elemento viabilizador secundário – “*secondary enabling feature*”) inclui o centro da circunferência associada; e as secções retas (elementos viabilizadores primários) são perpendiculares ao eixo do cilindro associado, obtido a partir da superfície integral extraída (ver figura 6.22).

Para a definição por omissão do tamanho (diâmetro) local de um cilindro extraído (de uma secção reta), aplicam-se as seguintes condições:

- a circunferência associada é a circunferência dos mínimos quadrados totais;
- o cilindro associado é o cilindro dos mínimos quadrados totais.

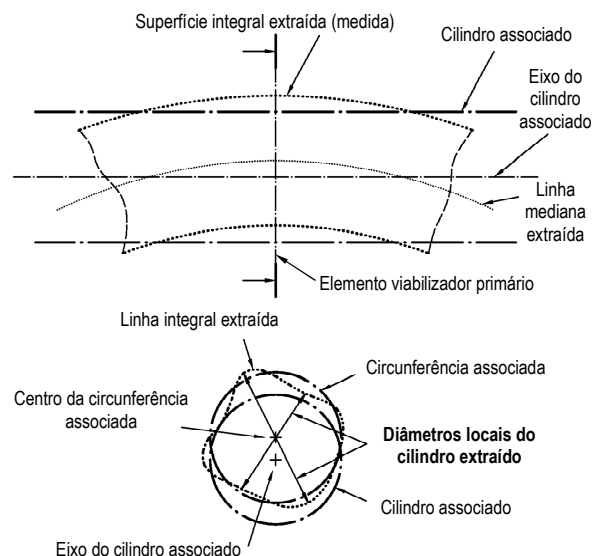


Figura 6.22 – Tamanho local (diâmetro local) de um cilindro extraído (ISO 14660-2)

- b) O “**tamanho local entre duas superfícies paralelas extraídas**” é a distância entre dois pontos em superfícies extraídas opostas, em que as linhas de conexão de conjuntos de pontos opostos são perpendiculares à superfície mediana do par de planos associados, que não estão contrangidos a serem paralelos entre si (contrariamente ao anteriormente estabelecido na ISO 14660-2) e foram obtidos a partir das superfícies extraídas (ver figura 6.23).

Para a definição por omissão do tamanho local entre duas superfícies paralelas extraídas, aplica-se a seguinte condição:

- os dois planos associados são obtidos pelo método dos mínimos quadrados totais, sem qualquer restrição em relação à matéria.

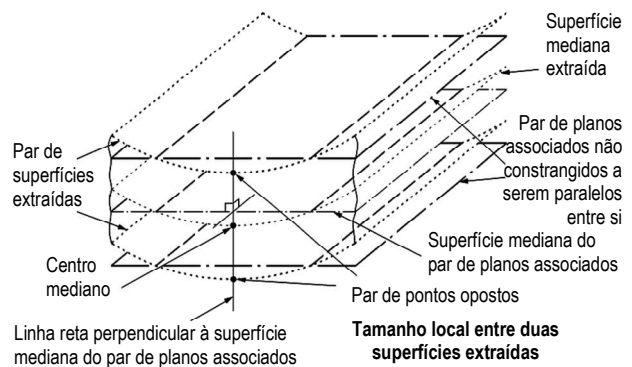


Figura 6.23 – Tamanho local entre duas superfícies paralelas extraídas (ISO 17450-3)

Na referência [G3], pode encontrar-se uma introdução ao “método dos mínimos quadrados totais”, com o qual se procura ajustar numericamente um elemento associado ao elemento extraído, de modo a minimizar a soma dos quadrados das distâncias ortogonais (as mais curtas) entre os pontos extraídos e o elemento geométrico associado.

Shakarji e Srinivasan [S3] mostraram que, nas normas ISO de toleranciamento, em vigor e em desenvolvimento, as especificações indicadas com base nos “mínimos quadrados totais” devem ser interpretadas segundo o critério dos “mínimos quadrados totais pesados”, em que os “pesos” são os comprimentos/áreas discretizados correspondentes ao número finito de pontos medidos, obtidos por amostragem dos elementos contínuos. Referem também as características de alguns dos novos instrumentos de medição como um motivo adicional, para a utilização dos “mínimos quadrados totais pesados”.

As tradicionais máquinas de medição de coordenadas por apalpação ponto-a-ponto (“*probing*”), ver exemplo na figura 6.13, podem ser pré-programadas para efetuarem amostragens mais ou menos uniformes nas superfícies em análise, às quais poderão ser associados, posteriormente, elementos ideais de acordo com o critério simples dos “mínimos quadrados totais”. No entanto, um operador que utilize, por exemplo, um braço articulado de medição de coordenadas, com um digitalizador (“*scanner*”) laser manobrado manualmente, não sabe, à partida, quantos pontos vai coligir nem tem qualquer certeza sobre a uniformidade da amostragem final, o que vai ter implicações na qualidade da operação de associação [S3].

Considere-se o caso da associação de dois planos paralelos ideais (em conformidade com a norma ISO 14660-2 anteriormente em vigor) às superfícies planas laterais de uma ranhura, resultante de uma especificação geométrica com a indicação expressa de um critério dos mínimos quadrados, e admita-se também que essas superfícies planas tinham um desvio de paralelismo. Na figura 6.24, mostra-se o efeito que as variações na amostragem podem ter no ajuste dos elementos associados pelo critério simples dos “mínimos quadrados totais”.

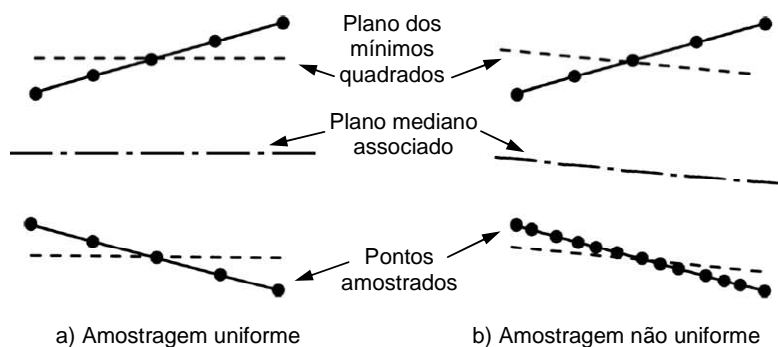


Figura 6.24 – Exemplo do efeito da variação da densidade de pontos amostrados no ajuste simples pelos mínimos quadrados totais. Adaptada de [S3]

Quando a amostragem é uniforme em ambas as superfícies, ver figura 6.24 a), a orientação dos planos paralelos associados corresponde ao desejado e esperado, nomeadamente condizendo com a



que seria obtida nas superfícies contínuas. No caso da amostragem não ser globalmente uniforme, ver figura 6.24 b), e o número de pontos ser muito maior numa das superfícies do que na outra, a orientação dos planos paralelos associados fica enviesada, um efeito que se desvia do que se registaria nas superfícies contínuas. A utilização dos “mínimos quadrados totais pesados”, em que os “pesos” correspondem ao comprimento ou à área em volta de cada ponto, evitam este efeito da amostragem.

Sem a utilização dos “mínimos quadrados totais pesados”, este efeito permanecerá mesmo quando se extraem grandes números de pontos, desde que subsista uma disparidade relativa entre os números de pontos amostrados em cada uma das superfícies. Este caso é realístico, já que os digitalizadores óticos podem adquirir muito mais informação numa superfície do que noutra, dependendo de fatores tais como: distância, tempo de amostragem. Iluminação e reflexividade da superfície.

Por exemplo, com um digitalizador laser 3D que adquira pontos em duas superfícies nominalmente planas e paralelas, com o mesmo tamanho nominal, se uma das superfícies estiver a uma distância de 2 metros do instrumento, enquanto a outra permanecer a 10 metros, a lei do “inverso do quadrado da distância” fará com que se possa esperar que o número de pontos recolhidos na superfície mais próxima do instrumento seja 25 vezes superior ao relativo à superfície mais afastada (independentemente de um manuseamento especial). Uma associação de planos paralelos pelo critério simples dos “mínimos quadrados totais” seria quase inteiramente determinada pela orientação do plano mais próximo. No caso em apreço, este efeito podia ser corrigido com a utilização dos “mínimos quadrados totais pesados”, se aos pontos da superfície mais próxima fossem atribuídos “pesos” com valores de  $1/25$  dos “pesos” atribuídos aos pontos da superfície mais distante [S3].

A generalidade das máquinas de medição de coordenadas, ao nível da indústria, não dispõe ainda de *software* que permita reproduzir adequadamente os procedimentos especificados na norma ISO 14660-2, entretanto substituída pela norma ISO 17450-3. No entanto, as definições da ISO 17450-3 (e anteriormente as da ISO 14660-2) são interessantes porque dão uma resposta única relativamente ao que deve ser um tamanho local. Por outro lado, estas definições não devem limitar a ação da metrologia, impondo-lhe procedimentos dispendiosos. Logo, é admissível que estes tamanhos possam vir a ser determinados com uma incerteza significativa do método de medição, desde que esta seja compatível com o fim em vista.

Assim, por exemplo, num elemento cilíndrico com um desvio de circularidade resultante de uma forma trilobada, o diâmetro medido com um paquímetro não é idêntico ao tamanho entre dois pontos opostos (diâmetro local) definido em conformidade com a norma ISO 14660-2 (ver figuras 6.25 e 6.22). Por conseguinte, existem casos em que esta definição não pode ser verificada através de instrumentos de metrologia convencional.

Nas máquinas de medição de coordenadas por apalpação, devido ao modo como é efetuada a amostragem dos pontos, não há qualquer garantia de que um ponto específico tenha um ponto

“conjugado” diametralmente oposto, de maneira a que possa ser calculado o “tamanho entre dois pontos”.

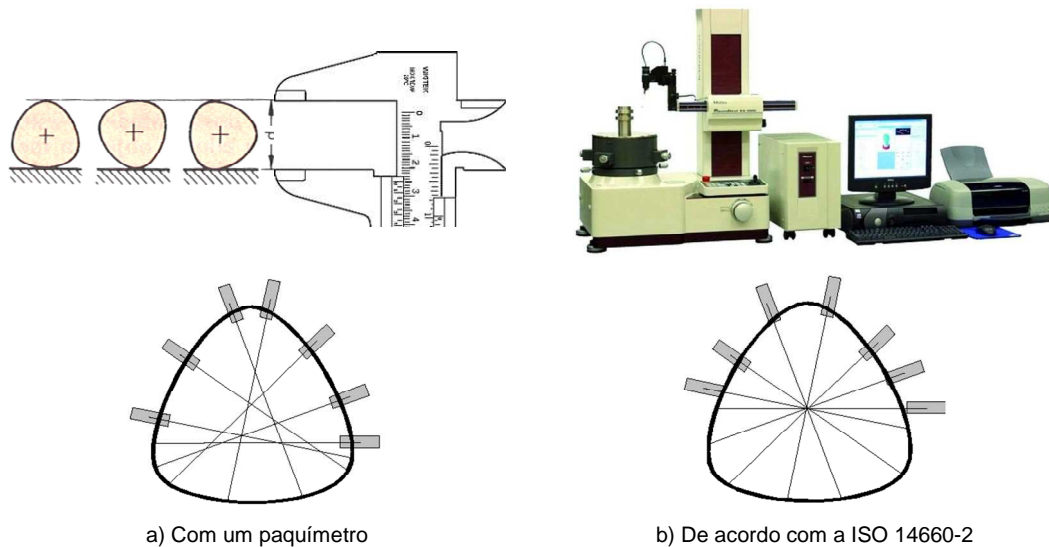


Figura 6.25 – Verificação de um cilindro com uma forma trilobada

Morse, Srinivasan et al. [M3] analisaram e desenvolveram algoritmos que permitissem a estimação do tamanho entre dois pontos. Se o método de seleção dos pares de pontos utilizado fosse aquele que tornasse possível encontrar os pares de pontos mais distantes numa secção reta, ver figura 6.26 a), é provável que o tamanho calculado fosse subestimado e a linha que conecta os dois pontos não passasse pelo centro da secção reta. O método que desenvolveram consistiu em encontrar um valor de tamanho com origem em cada ponto da secção reta, conforme se indica na figura 6.26 b).

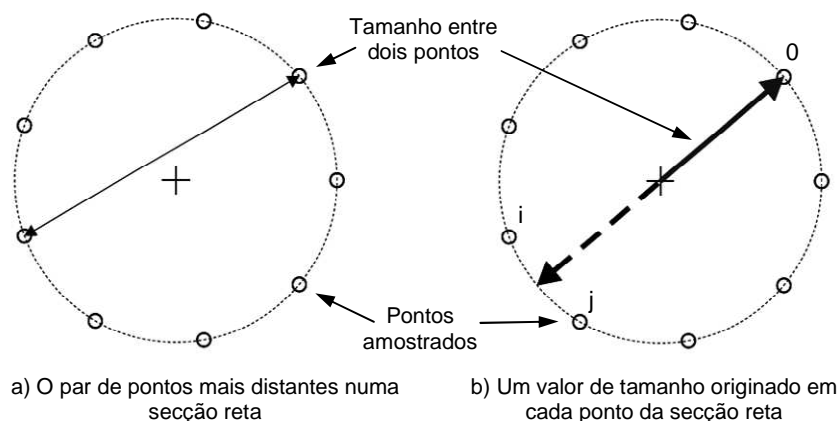


Figura 6.26 – Determinação do tamanho entre dois pontos a partir de pontos amostrados. Adaptada de [M3]

No procedimento adotado, à distância radial entre o centro da secção e um ponto inicial (seta a traço contínuo grosso) adiciona-se um “raio interpolado” entre pontos opostos ao ponto inicial (seta a traço interrompido). O raio interpolado é calculado determinando os raios ( $r_i$  e  $r_j$ ) e os ângulos ( $\theta_i$  e  $\theta_j$ ) para os pontos adjacentes e depois interpolando o seu valor entre os dois pontos, para um ângulo ( $\theta_0 + 180^\circ$ ) a partir do ponto inicial.

Na implementação deste método e no estudo posterior de estratégias de amostragem e sua influência nas mensurandas, Morse, Srinivasan et al. [M3] utilizaram um sistema de apalpação contínua (*“scanning”*) que permitiu a aquisição de conjuntos de pontos razoavelmente densos (em termos de máquinas de medição de coordenadas tradicionais). Em seguida, a partir desses conjuntos, consideraram também vários subconjuntos com diferentes números de pontos de amostragem e avaliaram a sensibilidade dos tipos de tamanho em análise em relação a essas amostragens, tendo concluído que as estratégias de amostragem espaçada, comuns na indústria, para permitir acelerar o controle, poderão introduzir uma incerteza significativa na estimativa dos tamanhos locais entre dois pontos.

### 6.3.2 Tipos de tamanhos lineares

A atual norma ISO 14405-1 fornece aos projetistas um conjunto substancial de novas ferramentas de especificação, para a indicação de diversos tipos de tamanhos lineares em elementos das peças, de modo que diferentes requisitos funcionais, para além da função de ajustamento, passassem a poder ser definidos com grande detalhe.

Antes da entrada em vigor desta norma, em 2010, estava implícito que os tamanhos toleranciados deveriam ser verificáveis através de instrumentos de metrologia convencional (paquímetros, micrómetros, comparadores, calibres funcionais, etc.), que continuam ainda a ser predominantes no âmbito da verificação manual. Por sua vez, a utilização de sistemas de medição de coordenadas era aceitável, desde que emulasse as capacidades da metrologia convencional. Em contrapartida, os novos conceitos estabelecidos nesta norma só podem ser verificados, adequadamente, através de sistemas de medição de coordenadas computadorizados, munidos de algoritmos para o ajuste numérico dos elementos associados aos elementos extraídos [S7].

A ISO 14405-1 estabelece o operador (conjunto ordenado de operações) de especificação por omissão (*“by default”*) para o tamanho linear e define um conjunto de operadores de especificação especiais para o tamanho linear dos elementos de tamanho do tipo “cilindro”, “dois planos paralelos opostos”, “esfera”, “toro”, “círcunferência”, “duas linhas retas paralelas opostas” ou “duas circunferências opostas”. Estabelece também os símbolos modificadores de especificação (ver quadro 6.3) e as indicações a inscrever nos desenhos, para definir estes tamanhos lineares (ver secção 6.3.5).

Por omissão, a indicação de tolerância para um tamanho aplica-se a um único elemento de tamanho completo. No entanto, é possível indicar que a tolerância diz respeito apenas a uma parte restrita (secção ou porção) qualquer ou a uma parte restrita fixa do elemento, ou ainda que se aplica a mais do que um elemento de tamanho (através do símbolo modificador  $n\times$ ).

Quadro 6.3 – Tipos de tamanhos lineares e respectivos símbolos modificadores de especificação (ISO 14405-1)

Descrição	Modificador
Tamanho (local) entre dois pontos	ⓁⓅ
Tamanho (local) definido por uma esfera	ⓁⓈ
Critério de associação dos mínimos quadrados	ⓖⓖ
Critério de associação do máximo inscrito	ⓖⓧ
Critério de associação do mínimo circunscrito	ⓖⓃ
Critério de associação minimax	ⓖⓈ
Diâmetro circunferencial (tamanho calculado)	ⒸⒸ
Diâmetro de área (tamanho calculado)	ⒸⒶ
Diâmetro de um volume (tamanho calculado)	ⒸⓋ
Tamanho máximo (por ordenação)	Ⓢⓧ
Tamanho mínimo (por ordenação)	ⓈⓃ
Tamanho médio (por ordenação)	ⓈⒶ
Tamanho mediano (por ordenação)	ⓈⓂ
Tamanho central (por ordenação)	ⓈⓉ
Amplitude de tamanhos (por ordenação)	ⓈⓇ
Desvio padrão de tamanhos (por ordenação)	ⓈⓆ

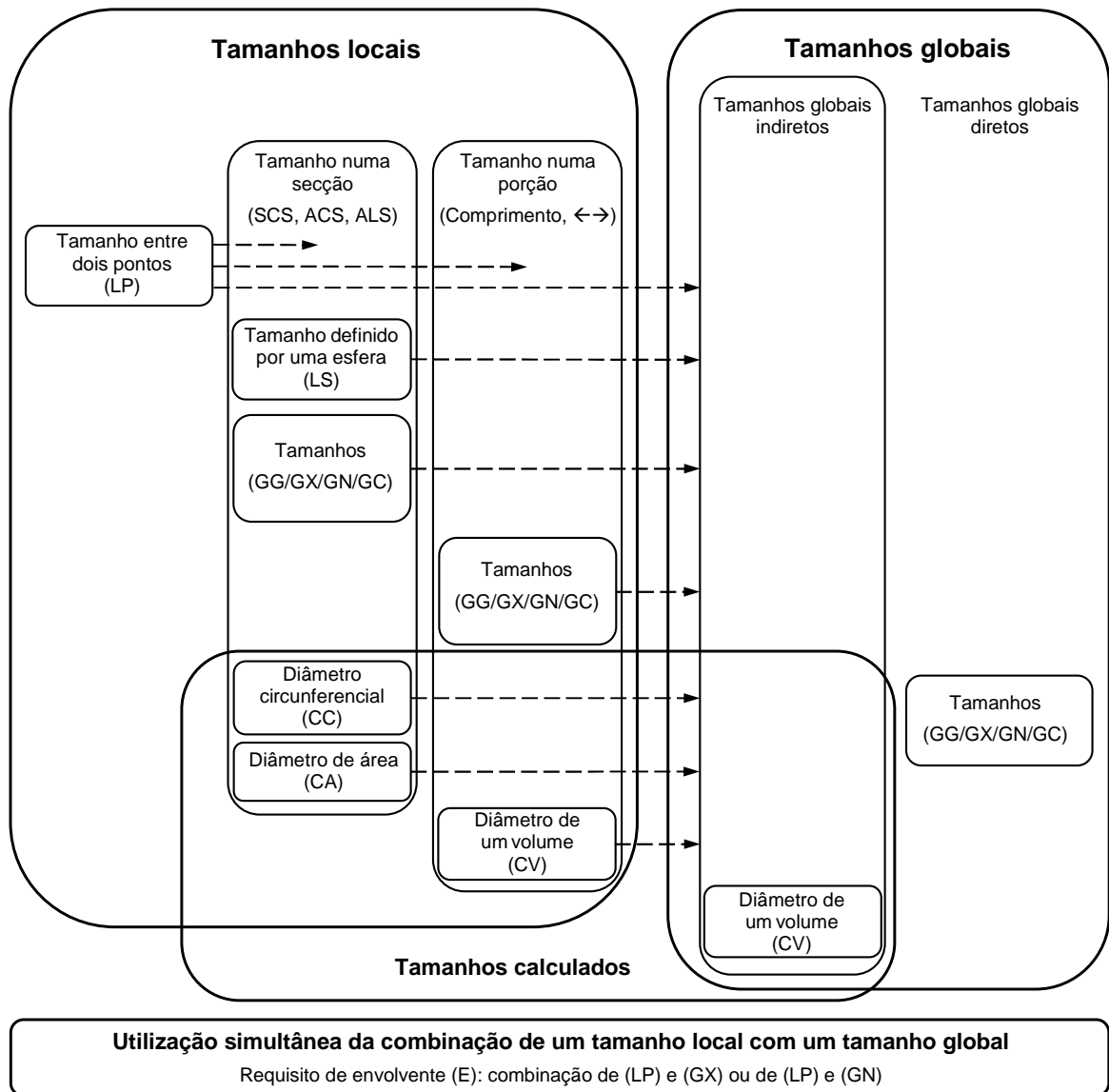
Estes tipos de tamanhos lineares podem ser reunidos em quatro grandes grupos (ver figura 6.27):

- i) Os “**tamanhos locais**” (“*local sizes*”) que são características de tamanho que, por definição, apresentam resultados de avaliação não únicos, ao longo e a toda a volta dos respectivos elementos de tamanho toleranciados. Logo, para um dado elemento de tamanho existe uma infinidade de tamanhos locais (ver exemplos nas figuras 6.29 e 6.31).
- ii) Os “**tamanhos globais**” (“*global sizes*”) que são características de tamanho que, por definição, apresentam um valor (resultado de avaliação) único, ao longo e a toda a volta dos respectivos elementos de tamanho toleranciados. Os tamanhos globais podem ser diretos ou indiretos.

Um **tamanho global direto** é igual ao tamanho de um elemento integral associado que é do mesmo tipo geométrico do elemento de tamanho (ver exemplos na figura 6.32). Um **tamanho global indireto** pode ser um tamanho por ordenação ou um tamanho calculado global.

- iii) Os “**tamanhos calculados**” (“*calculated sizes*”) que são tamanhos obtidos através de uma fórmula matemática que relaciona a característica intrínseca de um elemento com uma ou várias outras dimensões desse elemento. Um tamanho calculado pode ser um tamanho local ou um tamanho global (ver exemplos na figura 6.33).

- iv) Os “**tamanhos por ordenação**” (“*rank order sizes*”) que são características de tamanho definidas matematicamente a partir de um conjunto homogêneo de valores de tamanhos locais, obtidos ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho toleranciado (ver exemplos na figura 6.34).



**Legenda:**

--- ➔ Tamanho definido através de um **tamanho por ordenação**

Figura 6.27 – Esquema global das relações entre vários tamanhos lineares

Um “tamanho por ordenação” pode ser utilizado para definir um tamanho global indireto, a partir de tamanhos locais (tamanho entre dois pontos, tamanho definido por uma esfera, tamanho numa secção ou tamanho numa porção).

Um “tamanho por ordenação” pode ser utilizado para definir um tamanho local a partir de outros tamanhos locais, por exemplo, para definir um tamanho por ordenação numa secção, a partir de tamanhos entre dois pontos nessa secção, ver exemplo na secção 6.3.7.

Deste modo, o projetista passou a ter mais possibilidades para indicar, no desenho, o tipo de tamanho que melhor se relaciona com a função pretendida para um dado elemento de uma peça (figura 6.28). Um tamanho pode ser avaliado, no elemento extraído, através de uma ou mais características de tamanho.

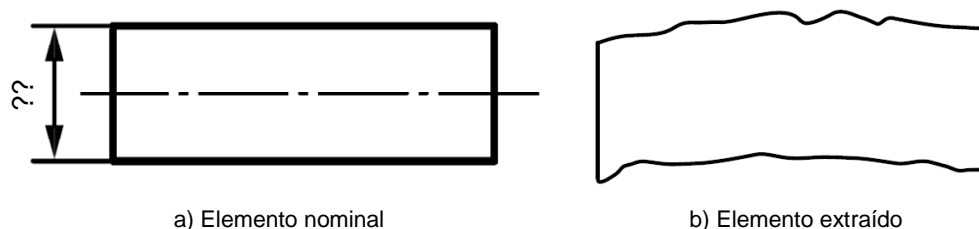


Figura 6.28 – Elemento de tamanho considerado que poderá ser um elemento exterior ou interior (ISO 14405-1)

Os tamanhos (características de tamanho), indicados no quadro 6.3, podem ser definidos de modo sucinto (ISO 14405-1):

- a) O “**tamanho entre dois pontos**” (LP) é a distância entre dois pontos opostos num elemento de tamanho linear integral extraído [ver figura 6.29 a)]. O tamanho entre dois pontos, num cilindro, pode designar-se de “diâmetro entre dois pontos” e, entre dois planos opostos, pode chamar-se “distância entre dois pontos” (ver também as correspondentes definições da ISO 14660-2 e da ISO 17450-3, apresentadas na secção 6.3.1 deste texto).

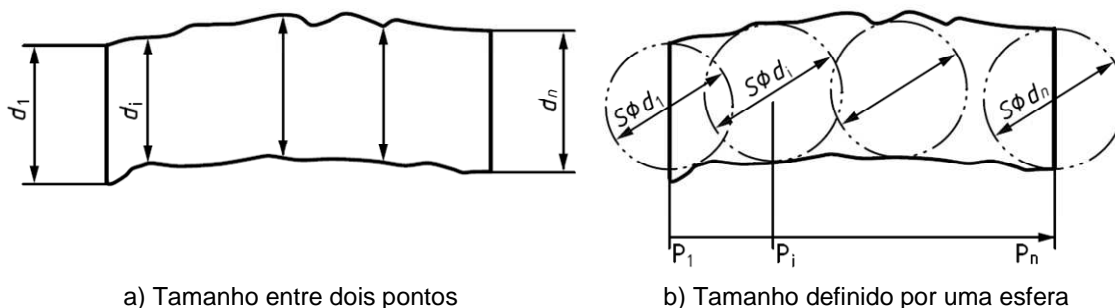


Figura 6.29 – Exemplos de tamanhos locais (ISO 14405-1)

- b) O “**tamanho definido por uma esfera**” (LS) é o valor do diâmetro da esfera máxima inscrita. A esfera máxima inscrita é utilizada para definir o tamanho de elementos de tamanho interiores e exteriores [ver figuras 6.29 b) e 6.30].

Na metrologia convencional, este tamanho podia ser medido através de um micrómetro de interiores de dois contactos ou controlado por meio de um calibre vareta de topos esféricos.

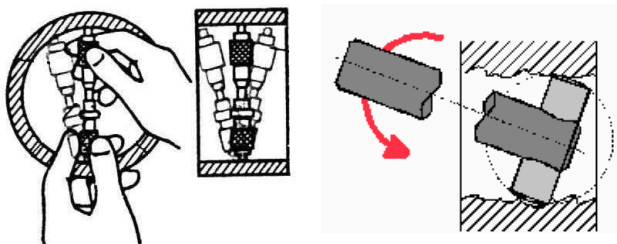
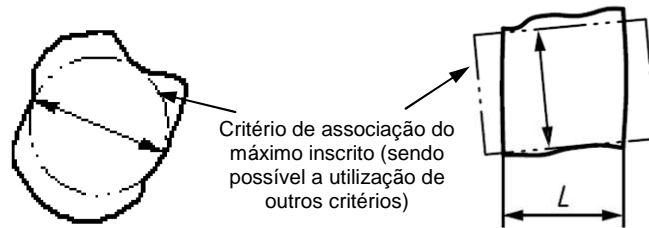


Figura 6.30 – Exemplos de tamanhos locais definidos por uma esfera

- c) O “**tamanho numa secção**” é um tamanho global numa dada secção reta do elemento integral extraído, mas é também um tamanho local em relação ao elemento de tamanho toleranciado completo [ver figura 6.31 a)].
- d) O “**tamanho numa porção**” é um tamanho global numa dada porção do elemento integral extraído, mas é também um tamanho local em relação ao elemento de tamanho toleranciado completo [ver figura 6.31 b)].

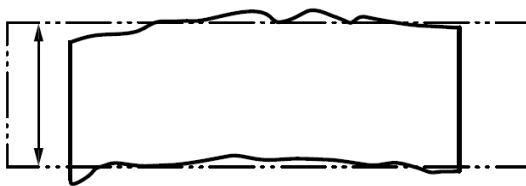


a) Tamanho numa secção

b) Tamanho numa porção

Figura 6.31 – Exemplos de tamanhos locais que são globais em parte do elemento (ISO 14405-1)

- e) O “**tamanho dos mínimos quadrados**” (GG) é o tamanho global direto para o qual é estabelecido um elemento integral associado, a partir do(s) elemento(s) integral(ais) extraído(s), através do **critério dos mínimos quadrados totais** [ver figura 6.32 a)].
- f) O “**tamanho máximo inscrito**” (GX) é o tamanho global direto para o qual é estabelecido um elemento integral associado, a partir do(s) elemento(s) integral(ais) extraído(s), através do critério do máximo inscrito [ver figura 6.32 b)].



a) Tamanho dos mínimos quadrados



b) Tamanho máximo inscrito



c) Tamanho mínimo circunscrito



d) Tamanho minimax

Figura 6.32 – Tamanhos lineares globais diretos (ISO 14405-1)

- g) O “**tamanho mínimo circunscrito**” (GN) é o tamanho global direto para o qual é estabelecido um elemento integral associado, a partir do(s) elemento(s) integral(ais) extraído(s), através do critério do mínimo circunscrito [ver figura 6.32 c)].

- h) O “**tamanho minimax**” (de Chebyshev ou de Tchebychev) (**GC**) é o tamanho global direto para o qual é estabelecido um elemento integral associado, a partir do(s) elemento(s) integral(ais) extraído(s), através do critério minimax [ver figura 6.32 d)].

O critério minimax, sem a restrição de ser interior ou exterior à matéria, fornece o elemento intermédio da zona mínima que inclui o elemento de tamanho real, minimizando o valor máximo do conjunto de distâncias entre os pontos do elemento extraído e o elemento associado.

- i) O “**diâmetro circunferencial** (de um cilindro extraído)” (**CC**) é o tamanho calculado correspondente ao diâmetro,  $d$ , obtido a partir do comprimento da linha integral extraída,  $C$ , numa secção reta normal ao eixo do cilindro associado pelos mínimos quadrados, através da expressão [ver figura 6.33 a)]:

$$d = C / \pi \quad (6.1)$$

- j) O “**diâmetro de área** (de um cilindro extraído)” (**CA**) é o tamanho calculado correspondente ao diâmetro,  $d$ , obtido a partir do valor de uma área,  $A$ , limitada pela linha integral extraída de uma secção reta normal ao eixo do cilindro associado pelos mínimos quadrados, através da expressão [ver figura 6.33 b)]:

$$d = \sqrt{(4 A / \pi)} \quad (6.2)$$

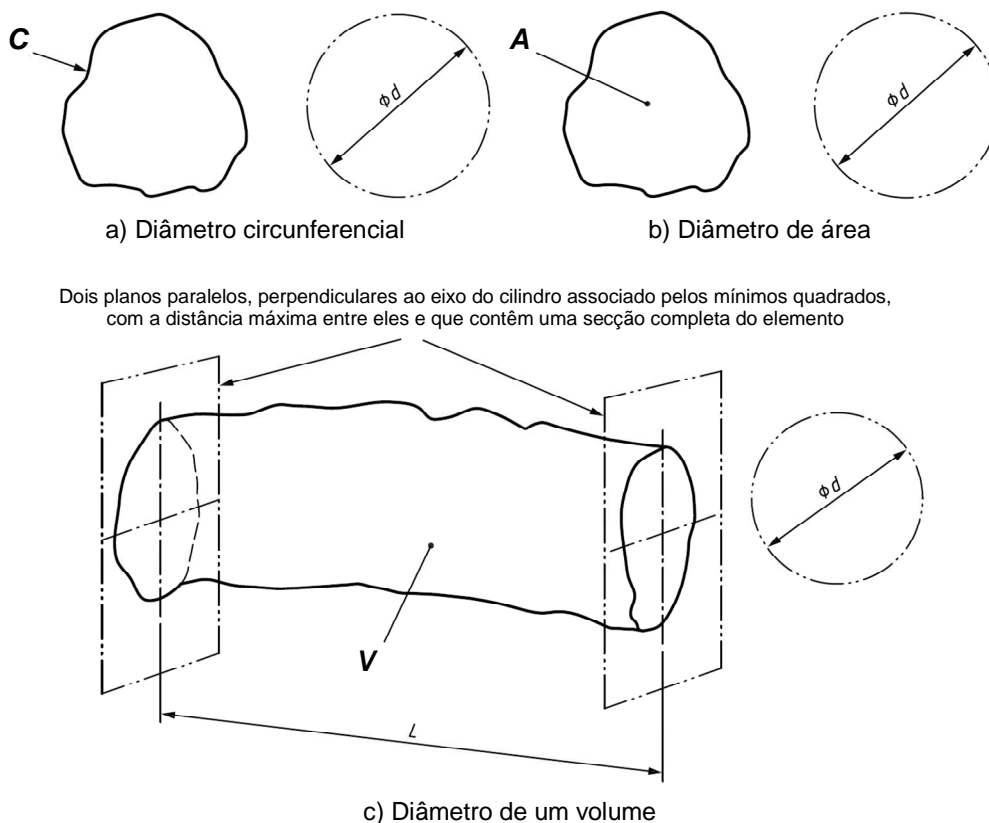


Figura 6.33 – Tamanhos calculados. Adaptada da ISO 14405-1

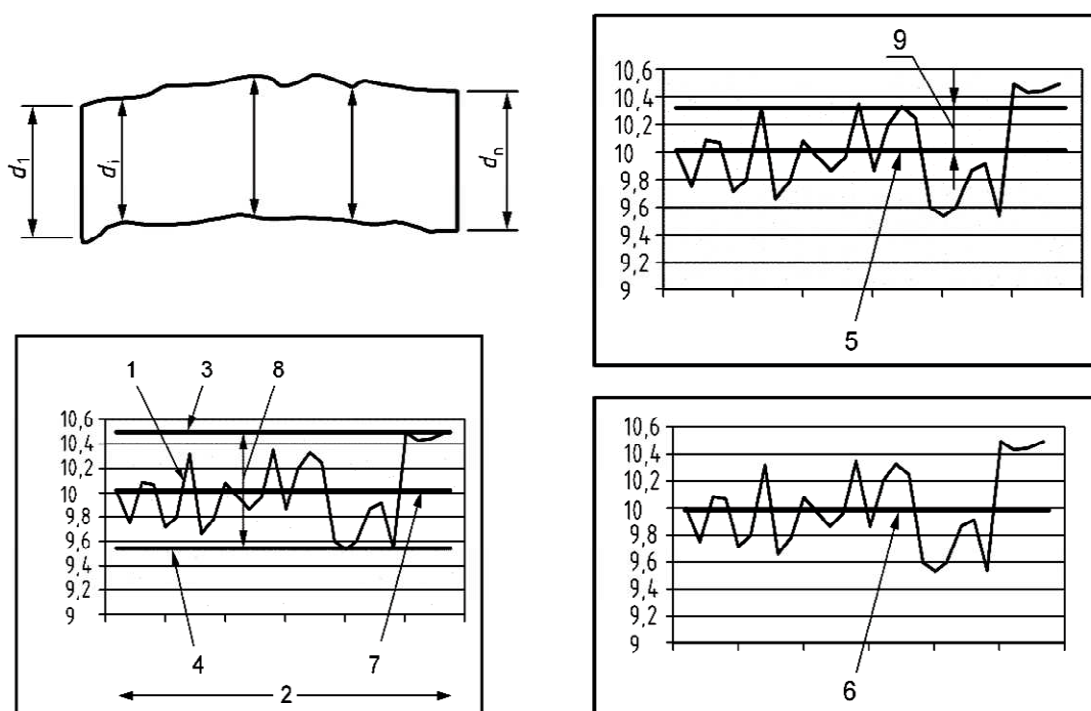


- k) O “**diâmetro de um volume** (de um cilindro extraído)” (**CV**) é o tamanho calculado correspondente ao diâmetro,  $d$ , obtido a partir do valor de um volume,  $V$ , limitado pelo cilindro integral extraído, de altura  $L$ , através da expressão [ver figura 6.33 c)]:

$$d = \sqrt[3]{4 V / (\pi L)} \quad (6.3)$$

Nas operações de associação para orientar a(s) secção(ões) reta(s), poderão ser utilizados vários critérios, sendo obtidos resultados diferentes, de acordo com o critério escolhido. O critério, por omissão, é o cilindro dos mínimos quadrados associado ao elemento.

- l) O “**tamanho máximo**” (**SX**) (“*maximum size*”) é o tamanho por ordenação definido como o máximo do conjunto de valores de um tamanho local ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho toleranciado (ver figura 6.34).
- m) O “**tamanho mínimo**” (**SN**) (“*minimum size*”) é o tamanho por ordenação definido como o mínimo do conjunto de valores de um tamanho local ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho toleranciado (ver figura 6.34).
- n) O “**tamanho médio**” (**SA**) (“*average size*”) é o tamanho por ordenação definido como a média do conjunto de valores de um tamanho local ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho toleranciado (ver figura 6.34).



**Legenda:**

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1 Conjunto de valores de tamanhos locais       | 5 Tamanho médio - SA             |
| 2 Posição dos tamanhos locais ao longo do eixo | 6 Tamanho mediano - SM           |
| 3 Tamanho máximo - SX                          | 7 Tamanho central - SD           |
| 4 Tamanho mínimo - SN                          | 8 Amplitude de tamanhos - SR     |
| $d_i$ Valores de tamanhos locais               | 9 Desvio padrão de tamanhos - SQ |

Figura 6.34 – Exemplo de tamanhos por ordenação baseados num conjunto de tamanhos entre dois pontos.  
Adaptada da ISO 14405-1

- o) O “**tamanho mediano**” (**SM**) (“*median size*”) é o tamanho por ordenação definido como o valor mediano do conjunto de valores de um tamanho local ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho toleranciado (ver figura 6.34).
- p) O “**tamanho central**” (**SD**) (“*mid-range size*”) é o tamanho por ordenação definido como a média do máximo e do mínimo do conjunto de valores de um tamanho local ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho toleranciado (ver figura 6.34).
- q) A “**amplitude de tamanhos**” (**SR**) (“*range of sizes*”) é o tamanho por ordenação definido como a diferença entre o máximo e o mínimo do conjunto de valores de um tamanho local ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho toleranciado (ver figura 6.34).
- r) O “**desvio padrão de tamanhos**” (**SQ**) (“*standard deviation of sizes*”) é o tamanho por ordenação definido como o desvio-padrão do conjunto de valores de um tamanho local ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho toleranciado (ver figura 6.34).

Estes tamanhos por ordenação, definidos a partir de conjuntos homogêneos de valores de tamanhos locais, são mais ou menos sensíveis ao tamanho das amostras de medidas locais consideradas. Por exemplo, variando o tamanho da amostra dos valores locais medidos, a variabilidade registada nos valores do “tamanho central” é, normalmente, muito superior à dos valores do “tamanho mediano”, uma vez que a mediana é uma medida robusta de tendência central, que é insensível à variabilidade nas caudas da distribuição dos tamanhos locais, enquanto o valor central se baseia nos valores mais extremos (“*outliers*”) da distribuição.

Morse, Srinivasan et al. [M3] confirmaram estes comportamentos ao estudarem a influência das estratégias de amostragem nas mensurandas, calculadas a partir de diferentes conjuntos de medidas de tamanhos entre dois pontos obtidas por via experimental.

### 6.3.2.1 O requisito de envolvente

O “**requisito de envolvente**” **(E)**, anteriormente designado de “Princípio de Taylor” (ver secção 6.1), é uma combinação do tamanho entre dois pontos, aplicado ao limite de mínimo de matéria do tamanho, com o tamanho mínimo circunscrito ou com o tamanho máximo inscrito, aplicado ao limite de máximo de matéria do tamanho. Pode ser aplicado a elementos de tamanho exteriores e interiores, do tipo “cilindro” ou “dois planos paralelos opostos”:

- a) O “**requisito de envolvente para elementos de tamanho exteriores**” é uma combinação do tamanho entre dois pontos,  $d_i$ , aplicado ao limite inferior de tamanho (LLS – “*lower limit of size*”), com o tamanho mínimo circunscrito,  $d_{\max}$ , aplicado ao limite superior de tamanho (ULS – “*upper limit of size*”), ver figura 6.35 a).

- b) O “**requisito de envolvente para elementos de tamanho interiores**” é uma combinação do tamanho entre dois pontos,  $D_i$ , aplicado ao limite superior de tamanho (ULS), com o tamanho máximo inscrito,  $D_{\text{min}}$ , aplicado ao limite inferior de tamanho (LLS), ver figura 6.35 b).

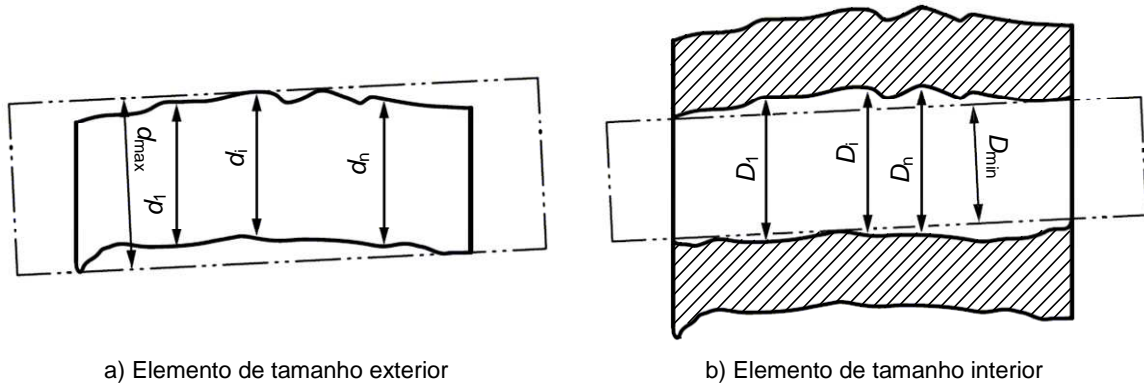


Figura 6.35 – Requisito de envolvente (E)

Este requisito significa que a envolvente de forma perfeita do elemento de tamanho no máximo de matéria não deve ser violada, traduzindo uma **condição de montagem local** entre um elemento de tamanho exterior (o “veio”) e um interior (o “furo”) – acoplamentos “veio-furo” com ajustamento de contacto fixo ou móvel – ao definir uma fronteira que não deve ser ultrapassada pela matéria dos dois elementos reais, de modo a assegurar a intermutabilidade das peças. Logo, o conceito de envolvente só se aplica a um dos limites da tolerância: o limite superior de tamanho (ULS), no veio, e o limite inferior de tamanho (LLS), no furo. Em simultâneo, os tamanhos locais medidos entre dois pontos, nos elementos extraídos, devem respeitar o outro limite da tolerância.

A verificação de dimensões “tamanho”, com base no requisito de envolvente, permite controlar, ao mesmo tempo, desvios geométricos de forma (retitude, circularidade e cilindridade ou retitude e planeza) e de orientação (paralelismo) existentes nos elementos de tamanho. A conformidade de um elemento com este requisito significa que os valores dos seus desvios geométricos são menores ou iguais à tolerância dimensional especificada. Esta verificação dimensional de elementos de tamanho pode ser efetuada por meio de dispositivos de metrologia digital computadorizada ou através de uma conjugação adequada de calibres de limites para peças lisas (ver exemplos na figura 6.5).

De acordo com a norma americana ASME Y14.5 – 2009, o controlo da forma geométrica prescrito pelos limites de tamanho, em resultado da especificação do requisito de envolvente, não se aplica:

- a matérias-primas tais como barras, chapas, tubos, perfis estruturais e outros semiprodutos fabricados de acordo com normas nacionais ou de indústria que prescrevem limites para a retitude, planeza e outras características geométricas. A menos que tenham sido especificadas tolerâncias geométricas, no desenho de uma peça realizada com base naqueles semiprodutos, as normas destes últimos determinam a qualidade das superfícies que permanecem na condição de “como fornecido”, na peça final;

- a peças sujeitas a variações no estado livre, na condição de não restringidas (ver ISO 10579).

No entanto, em certos casos especiais, os desvios de forma máximos admitidos pelo requisito de envolvente podem ser demasiado grandes para permitir um funcionamento satisfatório das peças acopladas. Em tais casos, devem ser especificadas tolerâncias geométricas individuais de forma (por exemplo, tolerâncias de retitude e/ou de circularidade).

Até 2010, por omissão, um tamanho toleranciado em conformidade com o sistema ISO de tolerâncias (ISO 286-1:1988) era interpretado de acordo com o requisito de envolvente, enquanto um tamanho sujeito a um toleranciamento  $\pm$  era um requisito ambíguo, uma vez que a sua interpretação não estava definida em qualquer documento normativo ISO. Com a publicação da ISO 14405-1:2010, o operador de especificação ISO, por omissão, para os tamanhos passou a ser o “tamanho entre dois pontos”. Logo, a especificação, num desenho, de um tamanho toleranciado segundo o requisito de envolvente é agora obrigatoriamente acompanhada pela inscrição do símbolo modificador **(E)**, ver exemplos no quadro 6.4 e na figura 6.43 c). Este procedimento é equivalente ao que era utilizado quando o princípio de aplicação geral a todo o desenho era o princípio de independência, especificado através da indicação “Toleranciamento ISO 8015”, no interior ou junto da legenda, que alterava a especificação por omissão (ISO 8015:1985).

Finalmente, deve registar-se que algumas normas nacionais (que deverão também ser indicadas no desenho) estabelecem que o requisito de envolvente é a especificação, por omissão, para elementos de tamanho e, por isso, não necessita de ser objeto de qualquer especificação individual no desenho. A norma ASME Y14.5 – 2009 e a antiga norma alemã DIN 7167 são os exemplos mais significativos da consagração desta prática. A ASME Y14.5, na sua Regra #1, estabelece que, num desenho onde apenas estejam prescritas tolerâncias dimensionais, os limites dimensionais de um elemento de tamanho individual controlam, adicionalmente, os seus desvios de forma. Por sua vez, a antiga DIN 7167 (anulada em 2010) estabelecia que se aplicava o requisito de envolvente, caso o desenho não contivesse qualquer referência à norma ISO 8015.

O requisito de envolvente serve para traduzir uma **condição de montagem local** (acoplamento “veio-cubo” com ajustamento de contacto fixo ou móvel), entre elementos de peças conjugadas. No entanto, qualquer tentativa para basear a **especificação geométrica de peças** mais complexas, por exemplo com ajustamentos simultâneos entre dois dos seus elementos, quase exclusivamente no **requisito de envolvente** apresenta limitações significativas, que são bem visíveis no exemplo apresentado na figura 6.36.

A figura 6.36 a) representa uma montagem entre duas peças com um duplo acoplamento “veio-cubo”, com a indicação das dimensões nominais da peça “veio”, que se pretende que possa vir a funcionar com um movimento deslizante na peça-guia “furo”.

Na figura 6.36 b), apresenta-se um desenho de definição parcial da peça “veio”, com uma especificação geométrica baseada quase exclusivamente no requisito de envolvente, com o objetivo de dar resposta aos requisitos funcionais da peça. Neste desenho, o desvio de planeza de uma superfície (real) extraída da base da peça, com 50 mm de comprimento, está limitado apenas através das tolerâncias gerais indicadas [ $t_G = 0,2$ , em conformidade com a ISO 2768-K].

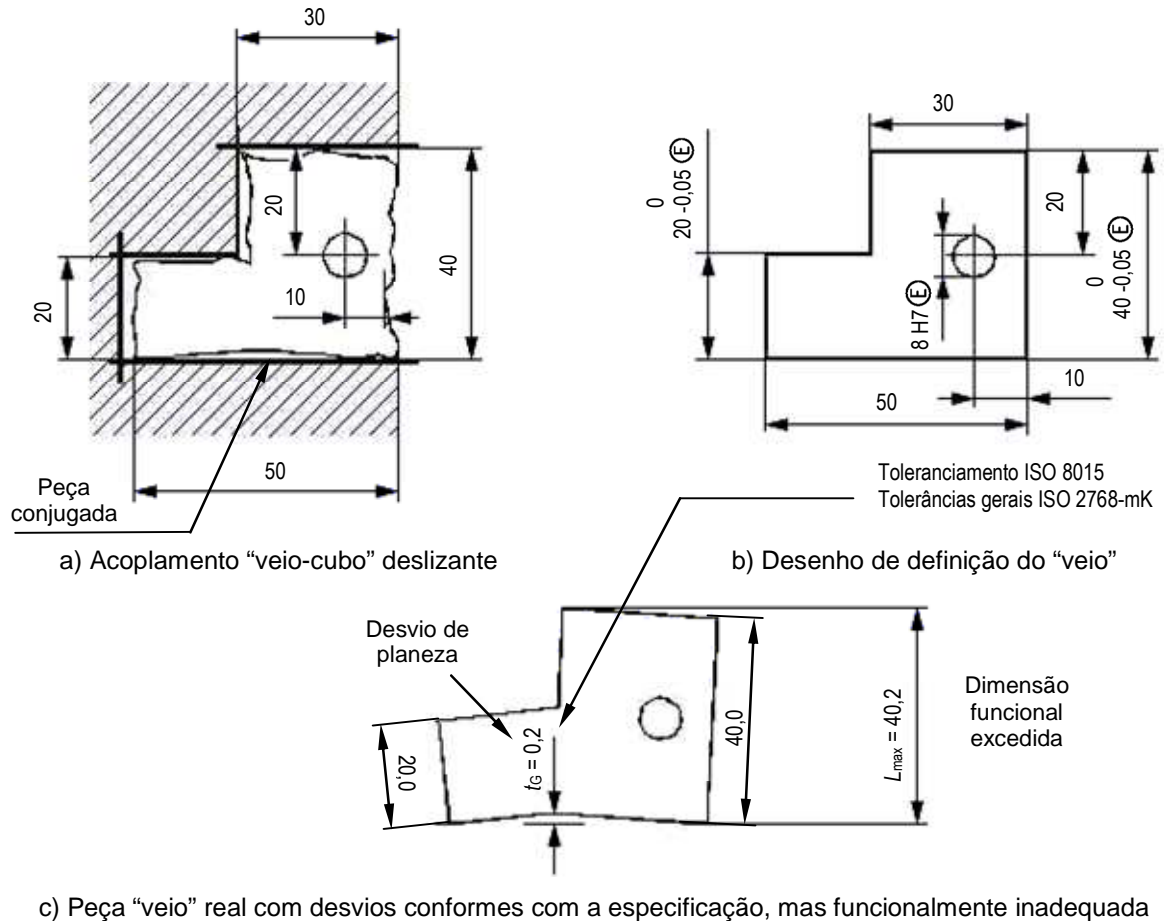


Figura 6.36 – Especificação e verificação geométricas de uma peça “veio” baseadas no requisito de envolvente. Adaptada de [G1]

A peça “veio” real, representada na figura 6.36 c), satisfaz as especificações constantes do seu desenho de definição parcial [ver figura 6.36 b)], embora os requisitos funcionais não tenham sido preenchidos, apesar do requisito de envolvente, que limita os desvios das formas toleranciadas, ter sido respeitado, o que deveria ter sido suficiente para assegurar a sua capacidade de montagem.

Alternativamente, a especificação de todos os aspetos de um elemento (forma, orientação e posição), que não são estritamente dimensionais, deve ser feita com base em tolerâncias geométricas (ver capítulo 7 e figura 6.37). Através da especificação de tolerâncias de localização, as folgas entre a peça-guia “furo” e os ressaltos da peça “veio”, que são importantes para a função do conjunto, podem ter uma variação de 0,05 mm. As superfícies limites de cada um dos ressaltos distam entre si, respetivamente,  $19,975 \pm 0,05/2$  e  $39,975 \pm 0,05/2$ . Em simultâneo, o desvio de planeza da superfície (real) extraída da base pode tomar valores até 0,05 mm.

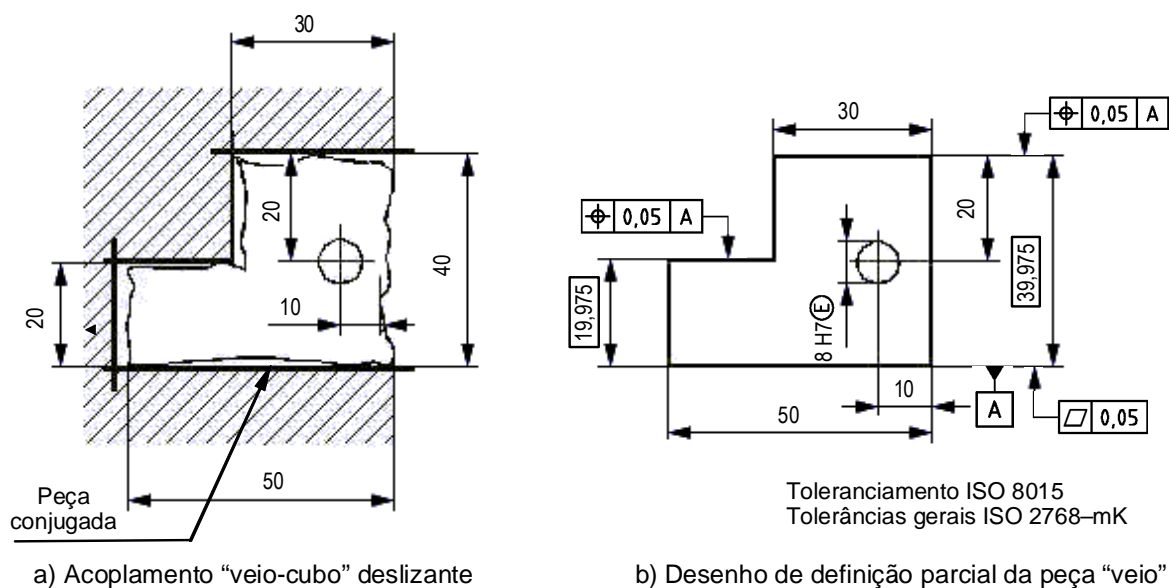


Figura 6.37 – Especificação geométrica da peça “veio”, orientada para a função, com base em tolerâncias geométricas de forma e de localização. Adaptada de [G1]

Atendendo a que as dimensões de montagem dos ressaltos são independentes da planeza da superfície (real) extraída da base da peça, mesmo uma tolerância de planeza superior à especificada poderia ainda ser aceitável. O desenho de definição da peça “veio”, apresentado na figura 6.37 b), satisfaz os requisitos funcionais do sistema.

### 6.3.3 Modificadores de especificação para tamanhos

Com base nos símbolos modificadores correspondentes aos diferentes tipos de tamanho, atrás definidos (ver quadro 6.3), complementados com os modificadores de especificação indicados no quadro 6.4, é possível definir, numa especificação dimensional, um tipo específico de característica de tamanho (local, global, etc.), que pode ser igual ou diferente para os limites superior e inferior da especificação, considerado mais adequado para o desempenho de uma dada função, de modo a permitir o controlo da definição do elemento geométrico e do método de avaliação a utilizar, ver exemplos na figura 6.43.

Quadro 6.4 – Modificadores de especificação complementares (ISO 14405-1)

Descrição	Símbolo	Exemplo de indicação
Elemento de tamanho unificado (“ <i>united feature of size</i> ”)	UF	UF 3x Ø10 ±0,1 $\overline{\text{GN}}$
Requisito de envolvente	$\textcircled{\text{E}}$	10 ±0,1 $\textcircled{\text{E}}$
Porção restrita qualquer do elemento	/ Comprimento	10 ±0,1 $\overline{\text{GG}}$ /5
Secção reta qualquer (“ <i>any cross section</i> ”)	ACS	10 ±0,1 $\overline{\text{GX}}$ ACS
Secção reta fixa específica (“ <i>specific fixed cross section</i> ”)	SCS	10 ±0,1 $\overline{\text{GX}}$ SCS

(continua)

Quadro 6.4 – Modificadores de especificação gerais para tamanhos (ISO 14405-1) (conclusão)

Descrição	Símbolo	Exemplo de indicação
Secção longitudinal qualquer ("any longitudinal section")	ALS	$10 \pm 0,1 \text{ (GX) ALS}$
Mais do que um elemento	Número $\times$	$2 \times 10 \pm 0,1 \text{ (E)}$
Elemento de tamanho toleranciado comum	CT	$2 \times 10 \pm 0,1 \text{ (E) CT}$
Condição de estado livre ("free-state condition")	(F)	$10 \pm 0,1 \text{ (LP) (SA) (F)}$
Entre ("between")	$\longleftrightarrow$	$10 \pm 0,1 \text{ A} \longleftrightarrow \text{B}$
Indicador de plano de interseção	$\langle // \rangle B$	$5 \pm 0,02 \text{ ALS} \langle \perp \rangle A$
indicador de elemento de direção	$\leftarrow // \rangle B$	$5 \pm 0,02 \text{ ALS} \leftarrow \langle \perp \rangle A$
Etiqueta ("flagnote") numerada para fornecer uma indicação complementar	$\hexagon{1}$	$10 \pm 0,1 \text{ (1)}$

De entre os símbolos modificadores apresentados no quadro 6.4, merecem destaque os seguintes:

- a) O “**elemento de tamanho toleranciado comum**” (CT) que é constituído por vários elementos de tamanho simples separados, considerados como um só elemento de tamanho no qual é aplicada uma tolerância comum, ver figura 6.38 b).



a) Elementos separados com avaliação individual      b) Coleção de elementos com tolerância comum

Figura 6.38 – Exemplos de toleranciamento de dois elementos de tamanho (ISO 14405-1)

Com a aplicação do princípio de independência a todo o desenho, por omissão, um dado requisito individual especificado a mais do que um elemento, através da utilização do modificador (**nx**), deve ser avaliado individualmente, em cada um dos elementos de tamanho considerados como elementos separados, ver figura 6.38 a). No caso do requisito individual se aplicar a uma coleção de vários elementos geométricos e essa coleção for considerada como um elemento de tamanho único, o requisito deve ser avaliado simultaneamente em todos os elementos, ver figura 6.38 b).

- b) O “**elemento de tamanho unificado**” (UF) que é um conjunto de dois ou mais elementos integrais simples considerados como um só elemento de tamanho (ver figura 6.39). Um elemento unificado pode ser um elemento integral que não seja um elemento de tamanho, ver as secções 7.4.3 e 7.5.1.1.

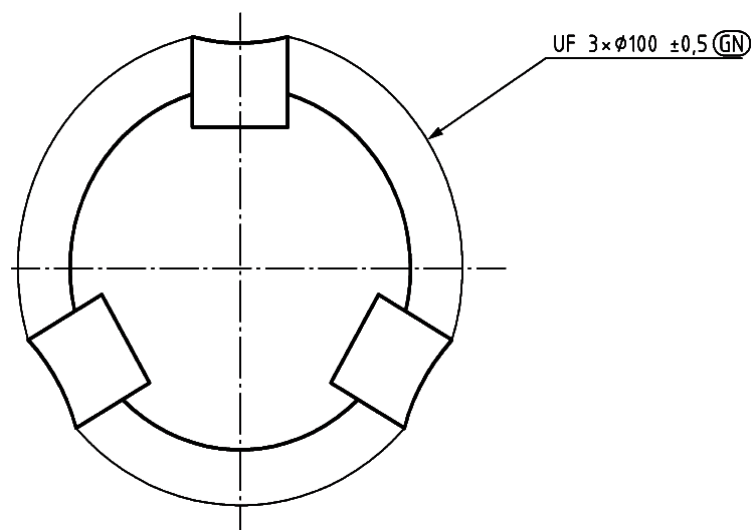


Figura 6.39 – Exemplo de requisito aplicado ao elemento de tamanho unificado completo (ISO 14405-1)

- c) A “**condição de estado livre**” (F), aplicada no toleranciamento de peças não rígidas (ISO 10579), segundo a qual as tolerâncias dimensionais seguidas do símbolo **F** devem ser asseguradas no estado livre (condição de uma peça sujeita apenas à ação da força da gravidade), ver figura 6.40.

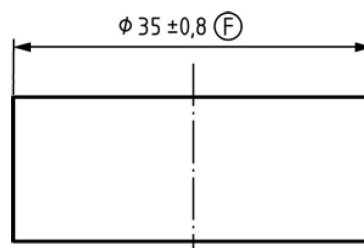


Figura 6.40 – Exemplo de requisito aplicado ao elemento na sua condição de estado livre (ISO 14405-1)

### 6.3.4 Os operadores de especificação, por omissão, para tamanhos

Quando a indicação GPS de base é utilizada para o tamanho linear, aplica-se o operador de especificação, por omissão, para tamanho. Este operador pode ser, por exemplo:

- o operador de especificação GPS ISO geral, por omissão;
- o operador de especificação GPS ISO geral, por omissão, específico do desenho;
- o operador de especificação GPS geral, por omissão, alterado (ver secção 5.5 e a ISO 8015).

A especificação GPS de base para um tamanho linear não inclui qualquer modificador de especificação, podendo assumir uma das formas indicadas no quadro 6.5.



Quadro 6.5 – Diferentes especificações GPS de base para tamanhos (ISO 14405-1)

Especificação GPS de base para tamanho linear	Exemplos		
Tamanho nominal $\pm$ desvios limites	0 150 -0,2	+0,2 Ø38 -0,1	55 $\pm$ 0,2
Tamanho nominal seguido do código (classe) de tolerância, em conformidade com a ISO 286-1	68 H8	Ø67 k6	165 js10
Valores dos limites superior e inferior de tamanho	150 149,8	Ø 38,2 Ø 37,9	55,2 54,8
Valor limite superior ou inferior de tamanho (limite num só sentido)	85,2 max. 84,8 min.		
Tamanho nominal sujeito a toleranciamento geral	Ø10, com a indicação p. ex. da norma ISO 2768-m na legenda		

a) O operador de especificação ISO geral, por omissão, para os tamanhos

O operador de especificação ISO geral, por omissão, para os tamanhos (sem modificador de especificação) é o “**tamanho entre dois pontos**”, que se aplica quando não há qualquer indicação no desenho relativa a outro operador de especificação, por omissão, para tamanhos.

Os conceitos expressos na norma ISO 14405-1 assentam numa metrologia digital computadorizada. A verificação de um tamanho linear entre dois pontos, recorrendo a um micrómetro, será realizada com uma incerteza significativa do método de medição.

Se o “tamanho entre dois pontos” (por omissão) se aplicar a ambos os limites especificados, não se deve indicar o modificador (LP) (ver exemplos na figura 6.41). Se o tamanho entre dois pontos se aplicar apenas a um dos dois limites especificados, o modificador (LP) deve ser indicado após o correspondente limite toleranciado ou desvio limite [ver exemplo na figura 6.43 c)].

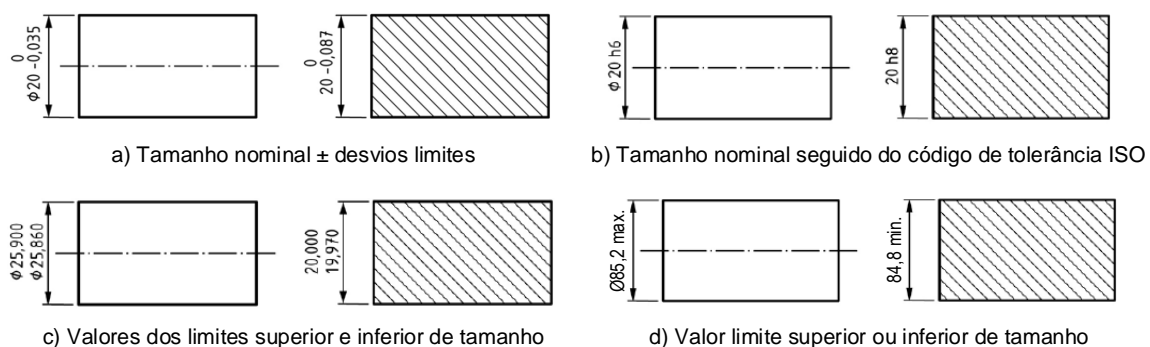


Figura 6.41 – Exemplos de especificações ISO GPS de base para tamanhos em elementos de tamanho do tipo “cilindro” e do tipo “dois planos paralelos opostos”. Adaptada da ISO 14405-1

b) O operador de especificação geral, por omissão, específico do desenho, para os tamanhos

Quando se aplicar um operador de especificação, por omissão, específico do desenho, para os tamanhos, tal deve ser indicado, no desenho, no interior ou junto da legenda, com a indicação do(s) modificador(es) de especificação relativo(s) à definição de tamanho, por omissão, escolhida, ver figura 6.42.

Para facilitar a leitura do desenho, é possível indicar, entre parêntesis, todos os outros tipos de modificadores utilizados no desenho, após a indicação da especificação, por omissão, específica do desenho.

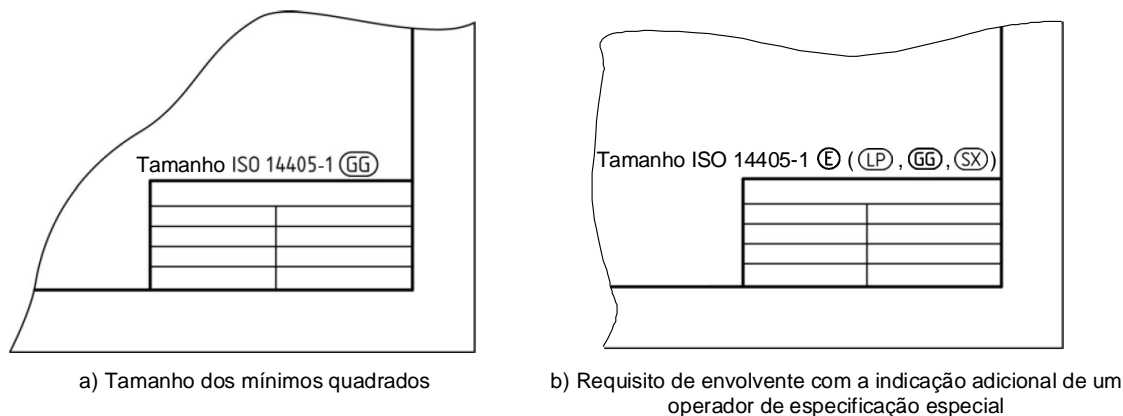


Figura 6.42 – Exemplos de alteração do operador de especificação, por omissão, para os tamanhos, aplicado a todo o desenho. Adaptada da ISO 14405-1

### 6.3.5 Exemplos de indicações nos desenhos de operadores de especificação especiais para tamanhos

Quando o operador de especificação, por omissão, para a característica de tamanho não se aplica a um dado elemento de tamanho, a indicação da tolerância deve mencionar qual ou quais os operadores de especificação especiais para o tamanho que se aplicam (ver exemplos na figura 6.43). Neste caso, devem utilizar-se os modificadores de especificação para o tamanho adequados (ver quadros 6.3 e 6.4) de modo a seleccionar as características de tamanho apropriadas. Os modificadores de especificação devem ser usados, na especificação GPS, de modo a formarem um conjunto.

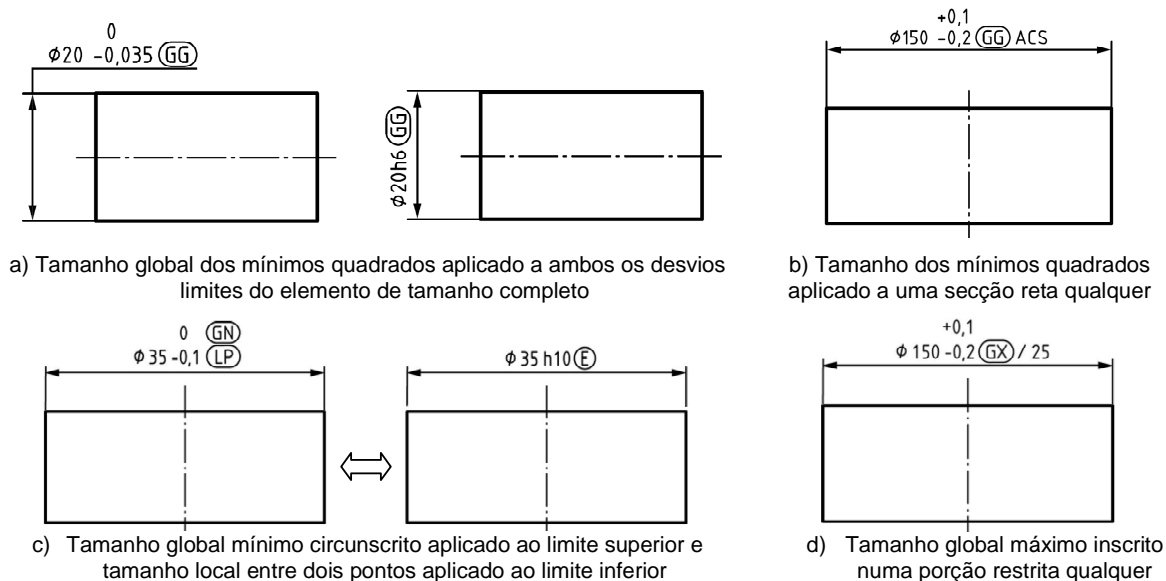


Figura 6.43 – Exemplos de especificações especiais de tamanhos lineares. Adaptada da ISO 14405-1

Seguidamente, apresentam-se alguns exemplos de aplicação de **modificadores por ordenação** em especificações de tolerâncias. Na figura 6.44 a), os limites superior e inferior de tamanho ( $\varnothing 50 \pm 0,02$ ) aplicam-se ao “tamanho central” dos valores de tamanhos entre dois pontos e o valor limite superior (0,004) refere-se à “amplitude de tamanhos” dos valores entre dois pontos (por omissão). Na figura 6.44 b), está indicado um operador de especificação relativo à espessura do anel de um rolamento, em que o valor limite superior (0,002) diz respeito à amplitude de valores dos tamanhos entre dois pontos da espessura da parede, em qualquer parte das superfícies não ideais, num plano que inclui o eixo A.

Registe-se que quando é necessário especificar uma “amplitude de tamanhos (por ordenação)”, basta indicar a diferença entre o máximo e o mínimo dos valores do tamanho local indicado. Por exemplo, na figura 6.44 a), a especificação 0,004 (SR) significa que a diferença entre os valores máximo e o mínimo do tamanho entre dois pontos (por omissão) deve ser menor ou igual a 0,004.

Na figura 6.44 c), os operadores de especificação representados, relativos à espessura do anel de um rolamento, são a amplitude de tamanhos (0,004) dos valores entre dois pontos definidos numa “secção reta qualquer” (ACS), perpendicular ao eixo A, e a amplitude de tamanhos (0,006) dos valores entre dois pontos definidos numa “secção longitudinal qualquer” (ALS) que inclua o eixo A. Finalmente, na figura 6.44 d), os operadores de especificação inscritos, relativos ao diâmetro, são os limites superior e inferior ( $20 \pm 0,01$ ) dos valores dos tamanhos entre dois pontos e o “desvio padrão” (0,002) dos valores entre dois pontos, definidos em qualquer parte da superfície real.

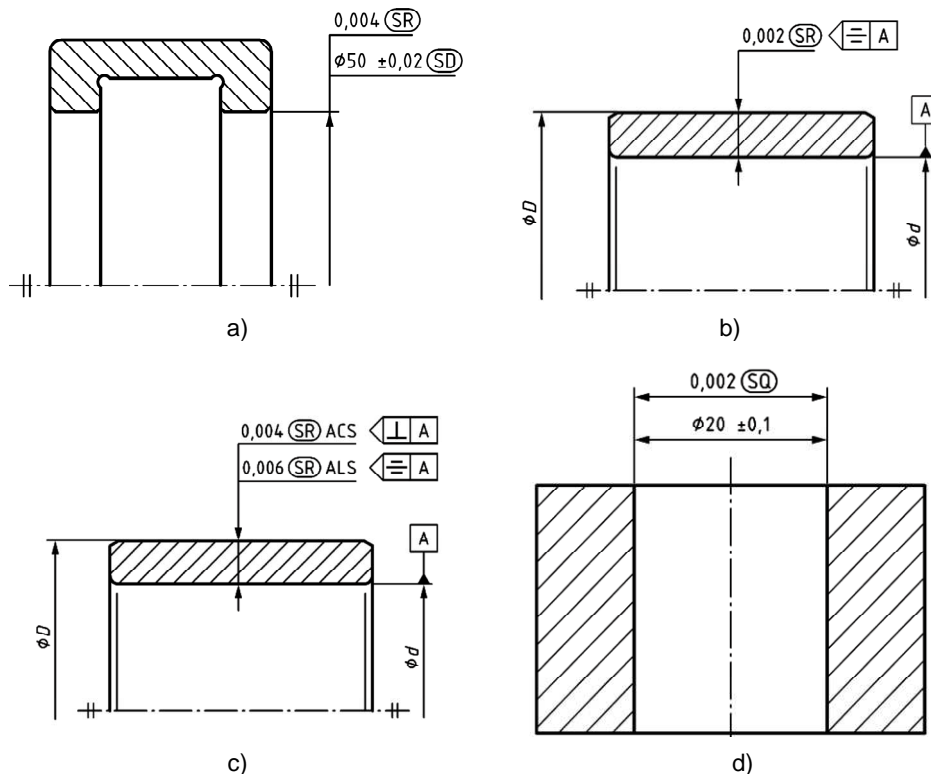


Figura 6.44 – Exemplos da utilização de símbolos modificadores por ordenação. Adaptada da ISO 14405-1

Para definir uma “característica global para cada porção ou para cada secção” do elemento toleranciado, se a especificação dimensional se aplicar a uma “porção restrita qualquer” ou a uma “secção reta qualquer” do elemento, o correspondente modificador pode ser precedido do modificador de ordenação considerado adequado, por exemplo:

$$25 \pm 0,1 \text{ (LP) (SA)/25, } 12 \pm 0,05 \text{ (LP) (SX) ACS ou (LP) (SD) ACS.}$$

Por fim, para definir uma “característica global do elemento completo”, quando o elemento toleranciado é uma “porção restrita qualquer”, uma “secção reta qualquer” ou uma “secção reta qualquer numa porção” do elemento, o modificador de ordenação deve ser colocado após o modificador para uma porção restrita ou para uma secção reta qualquer do elemento, por exemplo:

$$25 \pm 0,1 \text{ (GG)/25 (SA), } 12 \pm 0,05 \text{ (GG) ACS (SX) ou (LP) (SD) ACS (SR)}$$

### 6.3.6 A aplicação dos tamanhos por ordenação na especificação de rolamentos

Os fabricantes de rolamentos regem-se por princípios de toleranciamento especiais, uma vez que os anéis dos rolamentos são peças flexíveis. Logo, as classes de tolerância utilizadas nos rolamentos não têm correspondência com as classes do sistema ISO de tolerâncias (ISO 286). Na figura 6.45, pode observar-se um exemplo da especificação dimensional do diâmetro do anel interno de um rolamento rígido de uma carreira de esferas e do diâmetro da ponta de veio conjugada.

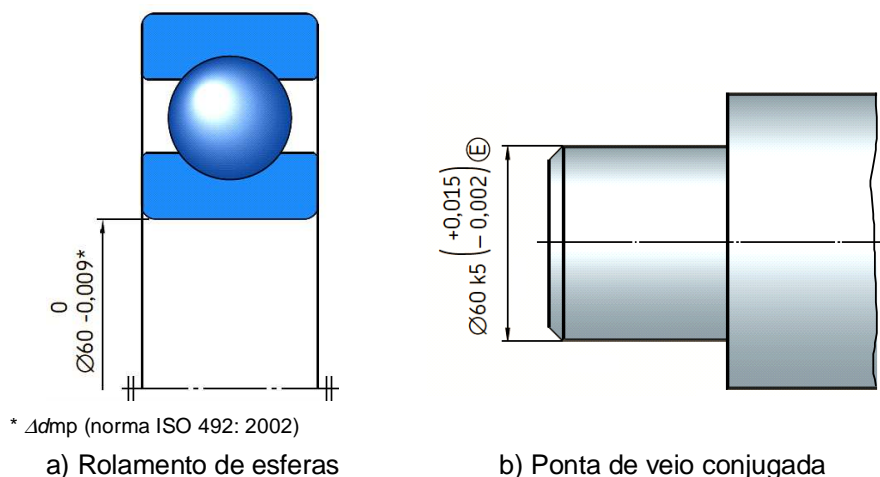


Figura 6.45 – Exemplo de toleranciamento dimensional do anel interno de um rolamento de esferas e da sua ponta de veio conjugada. Adaptada de [W3]

Este exemplo permite detetar as diferenças entre cada uma das especificações indicadas que podem ser descritas, sucintamente, do seguinte modo:

- o diâmetro do furo do rolamento é caracterizado através da indicação do desvio limite,  $\Delta d_{mp}$ , do “diâmetro central” do conjunto de diâmetros individuais,  $d_s$ , do furo [tradicionalmente designado de diâmetro médio,  $d_{mp} = (d_{smax} + d_{smin})/2$ ] em relação ao diâmetro nominal,  $d$ ,

( $\Delta d_{mp} = d_{mp} - d$ ), em cada uma das secções retas do furo consideradas, e o princípio de independência é, por omissão, o princípio de aplicação geral a todo o desenho, ver figura 6.45 a);

- o diâmetro da ponta de veio é caracterizado através da indicação da “classe de tolerância ISO” e dos seus correspondentes desvios limites, acompanhados pela especificação do “requisito de envolvente”  $\textcircled{E}$  que é recomendado no preenchimento da função de ajustamento, nomeadamente em ajustamentos incertos e com aperto, tal como se verifica na montagem de rolamentos, ver figura 6.45 b).

No caso dos rolamentos, este modo particular de especificação tem a ver com o facto dos anéis de muitos deles serem peças flexíveis que se deformam facilmente devido à sua pequena espessura e, por isso, antes da montagem, poderem ter desvios de forma (ovalizações) e dimensões que excedam os valores admissíveis. No entanto, após a sua montagem, nos veios e nas caixas de alojamento, com eles conjugados, adquirem uma configuração adequada e dimensões dentro dos limites admissíveis [K1, W3].

Neste contexto, não se torna necessário ter em consideração qualquer diâmetro particular para qualificar os rolamentos, bastando assegurar que os diâmetros médios,  $d_{mp}$  e  $D_{mp}$ , respetivamente dos anéis interior e exterior (atualmente designados de “diâmetros centrais”), estão dentro das tolerâncias, uma vez que estes serão provavelmente os diâmetros relevantes na montagem do rolamento em peças rígidas.

Uma vez que, para a interpretação das especificações geométricas tradicionalmente utilizadas para caracterizar os rolamentos, havia a necessidade de remeter o utilizador para detalhes adicionais indicados apenas na norma ISO 492:2002 e noutras normas específicas dos rolamentos, em 2007, o Comité técnico ISO/TC 4 – “*Rolling bearings*” decidiu adaptar as indicações existentes sobre tolerâncias para rolamentos à simbologia e definições do Comité técnico ISO/TC 213. No que diz respeito às tolerâncias dimensionais, esta decisão justificou a consideração de novos tipos de tamanhos, no âmbito da ISO 14405-1, nomeadamente o “tamanho central” (por ordenação)  $\textcircled{SD}$ , correspondente ao termo “diâmetro médio”, e a “amplitude de tamanhos” (por ordenação)  $\textcircled{SR}$  correspondente ao termo “variação de diâmetros”, tradicionais no domínio dos rolamentos.

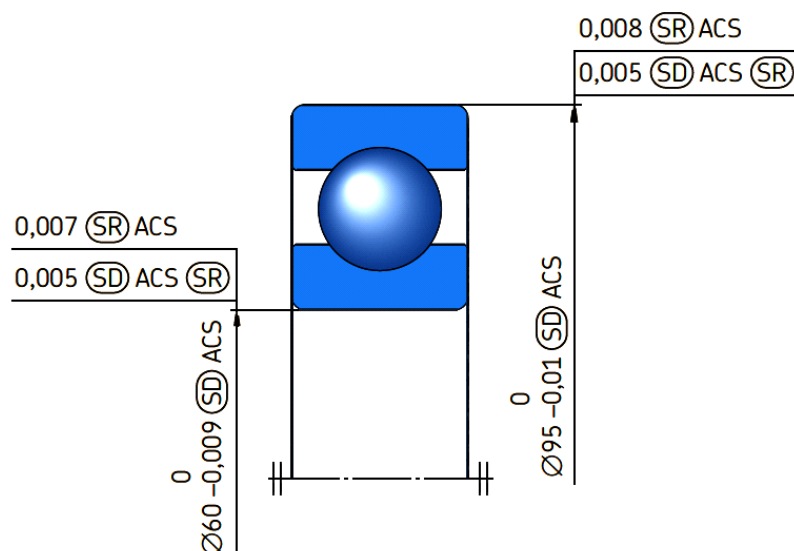
De acordo com o quadro 6.6, a versão atual da ISO 492:2014 passou a adotar os símbolos modificadores para a especificação de diferentes tipos de tamanhos, indicados na ISO 14405-1, em substituição dos correspondentes símbolos tradicionalmente utilizados nos rolamentos.

Com base nas especificações da norma ISO 492:2014, na figura 6.46, apresenta-se um exemplo de um desenho simplificado de um rolamento rígido de uma carreira de esferas com indicações diretas de tolerâncias apenas em algumas das dimensões principais. As dimensões nominais e os valores das tolerâncias indicadas correspondem a um rolamento com um diâmetro do furo  $\varnothing 60$ , da série de dimensões 10 e da classe de tolerância 5.

Quadro 6.6 – Evolução da simbologia relativa a tolerâncias dimensionais, na ISO 492

ISO 492: 2014		ISO 492: 2002	
Modificador	Descrição	Simb.	Descrição
(SD) ACS	Tamanho central dos valores dos tamanhos entre dois pontos definidos numa secção reta qualquer	$\Delta d_{mp}$	Desvio do diâmetro médio do furo, $d_{mp}$ , em relação ao diâmetro nominal do furo, $d$ , num plano isolado ( $\Delta d_{mp} = d_{mp} - d$ )
		$\Delta D_{mp}$	Desvio do diâmetro externo médio, $D_{mp}$ , em relação ao diâmetro externo nominal, $D$ , num plano isolado ( $\Delta D_{mp} = D_{mp} - D$ )
(SD) ACS (SR)	Amplitude dos tamanhos centrais definidos nas várias secções retas consideradas	$Vd_{mp}$	Variação do diâmetro médio do furo, considerando os diâmetros médios nos vários planos isolados ( $Vd_{mp} = d_{mpmax} - d_{mpmin}$ )
		$VD_{mp}$	Variação do diâmetro externo médio, considerando os diâmetros médios nos vários planos isolados ( $VD_{mp} = D_{mpmax} - D_{mpmin}$ )
(SR) ACS	Amplitude de tamanhos entre dois pontos definidos numa secção reta qualquer	$Vd_{sp}$	Variação dos diâmetros locais do furo, num plano isolado ( $Vd_{sp} = d_{spmax} - d_{spmin}$ )
		$VD_{sp}$	Variação dos diâmetros locais externos, num plano isolado ( $VD_{sp} = D_{spmax} - D_{spmin}$ )

As indicações de tolerâncias, na figura 6.46, são muito mais detalhadas do que as do correspondente desenho da figura 6.45. Ao incorporar os símbolos modificadores de tamanho adequados, em conformidade com a ISO 14405-1, o desenho permite a interpretação direta das especificações em causa, sem haver necessidade da consulta de pormenores mencionados em documentos adicionais.



#### OUTRAS TOLERÂNCIAS EM CONFORMIDADE COM A ISO 492: – CLASSE DE TOLERÂNCIA 5

Figura 6.46 – Exemplo de toleranciamento dimensional de um rolamento de esferas. Adaptada de [W3]

Complementarmente, a utilização de especificações GPS nos desenhos é suportada em normas GPS correlacionadas que permitem o esclarecimento de detalhes adicionais, de modo a evitar interpretações e procedimentos ambíguos, sobretudo durante as operações de verificação.

### 6.3.7 Exemplo de tratamento de dados com modificadores por ordenação

Considere-se o veio representado, na figura 6.47 a), em que o seu diâmetro está definido através da indicação de um “tamanho entre dois pontos” e de vários “tamanhos por ordenação”, obtidos a partir de conjuntos de tamanhos entre dois pontos medidos no elemento extraído.

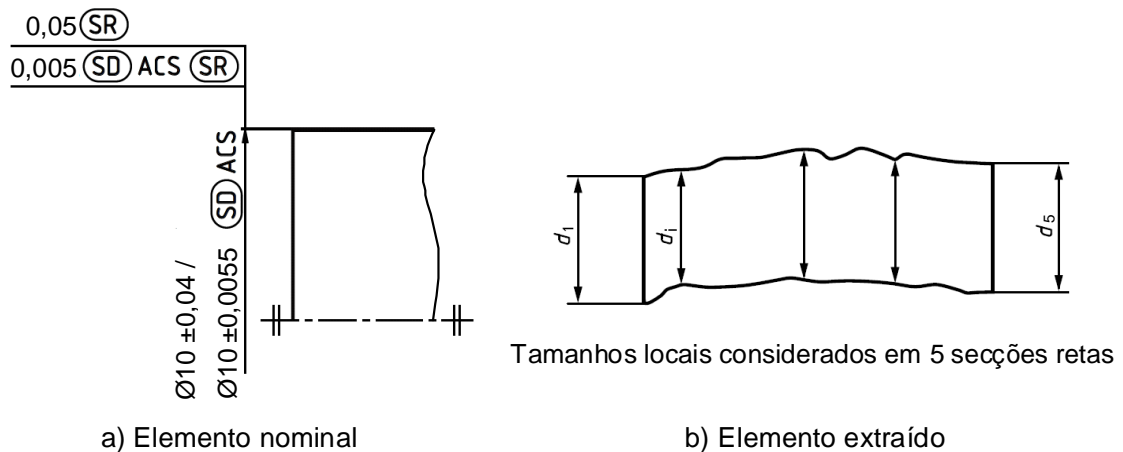


Figura 6.47 – Exemplo de um veio sujeito a toleranciamento dimensional com modificadores por ordenação

Como o “tamanho entre dois pontos” é o operador de especificação, por omissão, o símbolo modificador (LP) pode ser omitido na especificação. Assumindo que foram medidos 12 tamanhos (diâmetros) locais entre dois pontos, com um passo angular de 15°, em cada uma das cinco secções retas consideradas ao longo do comprimento do veio, no quadro 6.7, apresentam-se os resultados dessas medições, em que os valores máximo e mínimo, em cada uma das secções, foram representados enegrecidos, verificando-se que todos valores se encontram dentro dos limites da especificação  $\text{Ø}10 \pm 0,04$ .

Quadro 6.7 – Resultados das medições dos tamanhos do veio considerado (ISO 14405-1)

Medição n.º <i>j</i> numa secção	Posição angular numa secção, em °	Característica de tamanho local entre dois pontos (LP), na secção n.º <i>i</i>				
		1	2	3	4	5
1	0	10,000	10,000	9,996	9,995	<b>9,990</b>
2	15	10,010	10,015	10,016	10,003	10,008
3	30	10,012	10,009	10,005	10,017	10,008
4	45	10,009	10,007	10,011	10,009	10,013
5	60	10,011	10,010	10,016	<b>10,021</b>	10,007
6	75	<b>10,015</b>	<b>10,025</b>	<b>10,022</b>	10,009	10,006
7	90	10,005	9,997	10,007	10,013	9,996
8	105	10,006	10,002	10,006	10,014	<b>10,014</b>
9	120	10,004	10,012	10,013	10,006	10,006
10	135	9,997	10,002	10,002	<b>9,988</b>	10,002
11	150	<b>9,995</b>	<b>9,986</b>	<b>9,987</b>	9,993	10,000
12	165	9,999	10,008	10,007	10,007	9,996

(continua)

Quadro 6.7 – Resultados das medições dos tamanhos do veio considerado (ISO 14405-1) (conclusão)

	Resultados da medição para as seguintes sequências de modificadores					
Secção n.º	1	2	3	4	5	
$\textcircled{LP} \textcircled{SD} \text{ACS}$	10,005	<b>10,0055</b>	10,0045	10,0045	<b>10,0020</b>	—
$\textcircled{LP} \textcircled{SD} \text{ACS} \textcircled{SR}$	—	—	—	—	—	0,0035
$\textcircled{LP} \textcircled{SR}$	—	—	—	—	—	0,039
Tipo de característica de tamanho	Local					Global

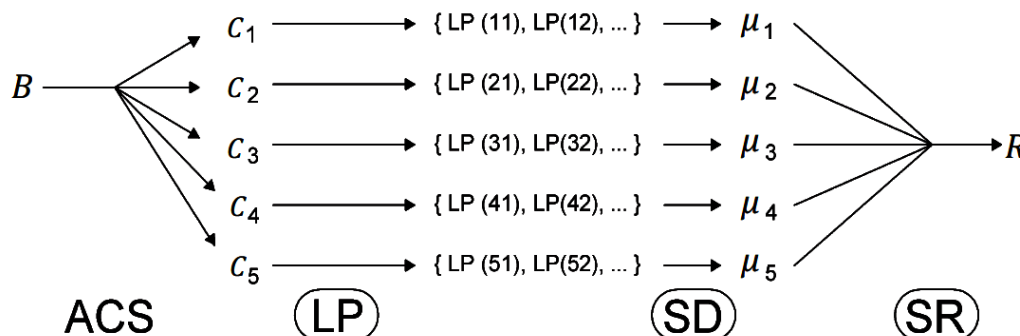
A partir dos valores de tamanhos locais,  $\textcircled{LP}$ , em cada uma das secções, foram calculados os cinco “tamanhos centrais (por ordenação)”,  $\textcircled{LP} \textcircled{SD} \text{ACS}$ , que são tamanhos globais de cada secção considerada, mas que funcionam como tamanhos locais em termos do elemento toleranciado completo. Finalmente, determinaram-se a “amplitude dos tamanhos centrais (por ordenação)” calculados nas várias secções consideradas,  $\textcircled{LP} \textcircled{SD} \text{ACS} \textcircled{SR}$ , e a “amplitude de tamanhos entre dois pontos” definidos nas secções consideradas,  $\textcircled{LP} \textcircled{SR}$ , que são características globais em termos do elemento toleranciado completo. Todas as características calculadas respeitam os limites das especificações indicadas no desenho da figura 6.47 a).

Deste modo, essa espécie de operador de especificação definido, no desenho da figura 6.47 a), como  $0,005 \textcircled{LP} \textcircled{SD} \text{ACS} \textcircled{SR}$  é um operador de especificação equivalente à descrição das características  $V_{dmp}$  e  $VD_{mp}$ , definidas textualmente na norma ISO 1132-1 (sobre tolerâncias de rolamentos) e já referidas no quadro 6.6, que pode também ser explicitado do seguinte modo:

Seja  $i$  o índice relativo à secção reta e  $j$  o índice de um valor em cada secção reta.

$LP(i, j)$  Representa o valor número  $j$  avaliado na secção  $i$ ;  
 $\mu_i = E_i(LP(i, j))$  Representa o valor médio, na secção  $i$ , avaliado a partir do conjunto de valores  $LP(i, j)$ ;  
 $R = \text{Max}(\mu_i) - \text{Min}(\mu_i)$  Representa a amplitude avaliada a partir do conjunto de valores  $\mu_i$ .

Na figura 6.48, pode observar-se o modo como, no exemplo em análise, a sequência de modificadores de tamanho atua sobre o conjunto primário de dados  $B$  (“tamanhos entre dois pontos”).

Figura 6.48 – Representação esquemática do operador de especificação  $\textcircled{LP} \textcircled{SD} \text{ACS} \textcircled{SR}$  (ISO 14405-1)



O modificador ACS gera um conjunto de subconjuntos  $C_i$  desse conjunto primário. Para cada subconjunto  $C_i$  (em cada secção reta), é gerado um valor médio  $\mu_i$  (“tamanho central”). Finalmente, a partir do conjunto de valores médios  $\mu_i$ , é calculado um valor de “amplitude  $R$  (dos tamanhos centrais)”.

Finalmente, deve assinalar-se que a sequência de operações no conjunto de dados nem sempre segue a sequência dos modificadores na especificação. Por exemplo, a subdivisão do conjunto primário de dados  $B$ , por secção ou por porção, conforme aplicável, é sempre a primeira operação a ter lugar, independentemente da ordem do correspondente modificador na sequência respetiva.

## 6.4 O sistema ISO de tolerâncias para tamanhos lineares

### 6.4.1 Generalidades

O sistema de codificação ISO para tolerâncias e desvios em tamanhos lineares foi publicado pela primeira vez em 1962, sob a forma de recomendação ISO/R 286 (ver secção 6.1), aplicando-se a elementos de tamanho (“*features of size*”) do tipo “cilindro” e do tipo “duas superfícies planas paralelas opostas”. Para além do **sistema ISO de tolerâncias e desvios**, a Parte 1 da atual norma ISO 286:2010 fornece uma seleção normalizada de “classes de tolerância para aplicações correntes” (ver secção 6.4.2.5). Adicionalmente, define a terminologia de base para os **ajustamentos** entre dois elementos de tamanho sem restrições de orientação e de posição (ver secção 6.4.3), explica os princípios dos ajustamentos de “furo normal” e de “veio normal” e indica um conjunto de “ajustamentos recomendados para aplicações correntes” em engenharia (ver secção 6.4.3.4).

No sistema ISO de tolerâncias, o termo “**veio**” ou “**furo**” é utilizado para designar elementos de tamanho do tipo “cilindro” (p. ex. no toleranciamento do diâmetro de um veio ou furo), mas também do tipo “duas superfícies planas paralelas opostas” (p. ex. no toleranciamento da espessura de uma chaveta ou da largura de uma ranhura), ver exemplos na figura 6.49.

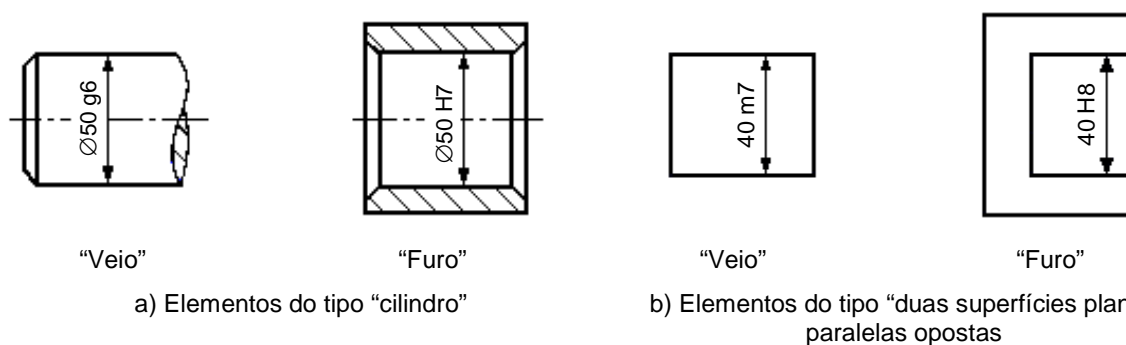


Figura 6.49 – Exemplos de toleranciamento de elementos de tamanho com o código ISO da classe de tolerância

Na norma ISO 286-1:2010, a principal alteração registada, em relação às edições anteriores, prende-se com o facto da especificação, por omissão, para tamanhos ter passado a ser o “tamanho entre

dois pontos”, em consonância com a aplicação, por omissão, do princípio de independência, a todo o desenho (ver normas ISO 8015 e ISO 14405-1). Logo, os tamanhos com códigos ISO das classes de tolerância, de elementos destinados a preencher uma função de ajustamento entre peças a montar, devem ser indicados, no desenho, em conjunto com o símbolo  $\textcircled{E}$  relativo ao “requisito de envolvente”, p. ex.  $\varnothing 12 \text{H7 } \textcircled{E}$  e  $\varnothing 12 \text{h6 } \textcircled{E}$ , inscritos na figura 6.50 (ver também a secção 6.3.2.1).

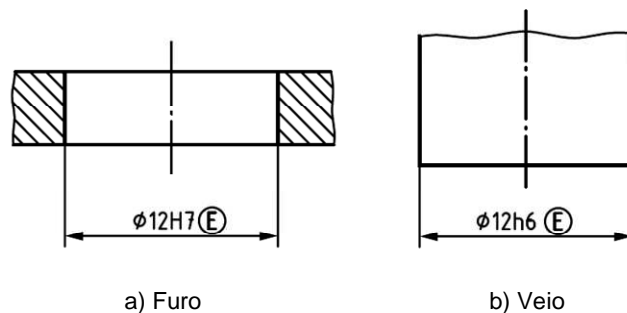


Figura 6.50 – Exemplos de elementos “furo” e “veio” toleranciados com a especificação do “requisito de envolvente” para poderem preencher uma função de ajustamento

As restantes alterações são menos relevantes e podem ser resumidas ao seguinte:

- o termo “intervalo de tolerância” – valores variáveis do tamanho compreendidos e englobando os limites de tolerância – substituiu o termo “zona de tolerância” que, no domínio GPS, se refere a um espaço ou a uma área;
- a consideração de mais dois intervalos de tamanhos nominais, nos quadros 6.12 e 6.13 dos desvios fundamentais, para as posições CD, EF e FG (para furos) e cd, ef e fg (para veios), que são utilizados, apenas, em mecânica fina e relojoaria;
- um aumento ligeiro das possibilidades de escolha das classes de tolerância preferenciais para “aplicações correntes”, ver figuras 6.55 e 6.56.
- um conjunto de ajustamentos recomendados para “aplicações correntes” que não existia em anteriores edições desta norma, ver figuras 6.64 e 6.65.

## 6.4.2 Sistema de codificação ISO para tolerâncias de tamanhos lineares

### 6.4.2.1 Graus de tolerância normalizados

Os **graus de tolerância** normalizados (“*standard tolerance grades*”) são grupos de tolerâncias de tamanhos lineares caracterizados através de um identificador comum. São designados pelas letras IT (“*International Tolerance*”) seguidas pelo número do grau, por exemplo **IT7**. Um grau de tolerância específico é considerado como correspondendo a um dado nível de exatidão para todos os tamanhos nominais. Quando o grau de tolerância é associado a (uma) letra(s) que representa(m) um desvio fundamental (ver secção 6.4.2.3), de modo a formar uma **classe de tolerância**, as letras IT são omissas, por exemplo **H7** (ver secção 6.4.2.4).

O “sistema ISO de tolerâncias e ajustamentos” prevê, no intervalo de tamanhos nominais de 0 a 500 mm, um total de 20 graus de tolerância normalizados (os graus IT01 e IT0, para casos especiais, e os graus IT1 a IT18, para utilização geral), e no intervalo de tamanhos nominais de 500 a 3150 mm (inclusive) um total de 18 graus de tolerância normalizados (IT1 a IT18). Os valores dos graus de tolerância normalizados são fornecidos no quadro 6.8, onde, adicionalmente, são dadas algumas indicações gerais sobre as correspondentes exatidões, verificações, operações de trabalho mecânico e aplicações.

Quadro 6.8 – Valores de graus de tolerância normalizados IT, para tamanhos nominais até 3150 mm (ISO 286-1)

Tamanho nominal mm		Graus de tolerância normalizados																			
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Acima	Até e Incluindo	Valores de tolerância normalizados																			
		μm														mm					
—	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630			9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800			10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1000			11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1000	1250			13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1250	1600			15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1600	2000			18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2000	2500			22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2500	3150			26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33
EXATIDÃO		Alta exatidão						Constr. mecânica – Ajustamentos						Constr. mec. corr.: fina - média - gros. - m. gros.							
VERIFICAÇÃO		Medição – calibração						Controlo – calibres						Medição (micrómetro, paquímetro, etc.)							
MAQUINAR			Superacabamento					Máquinas-ferramenta correntes						Laminagem – trefilagem – forjamento, etc.							
APLICAÇÃO		Aparelhos de medição						Ajustamentos – tamanhos funcionais						Tamanhos não funcionais							

O sistema ISO, derivado do Boletim ISA 25 que cobria apenas os tamanhos nominais até 500 mm, inclusive, e tinha resultado principalmente da experiência prática industrial, não foi melhorado de um ponto de vista matemático coerente e apresenta, portanto, soluções de continuidade e fórmulas diferentes para os valores de tolerância normalizados. Os correspondentes valores de tolerância para tamanhos nominais superiores a 500 mm, mas menores ou iguais a 3150 mm, foram aperfeiçoados posteriormente e englobados no sistema ISO. A 1ª edição da norma ISO 286-1, em 1988, incluía, no seu Anexo A, as expressões utilizadas no cálculo dos valores, inscritos no quadro 6.8, para os “graus de tolerância” e, nos quadros 6.12 e 6.13, para os “desvios fundamentais” de furos e de veios.

Por medida de simplicidade, os graus de tolerância normalizados e os desvios fundamentais não são calculados separadamente para cada tamanho nominal, mas sim para intervalos de tamanhos nominais, indicados nos quadros respetivos. Os valores de tolerância normalizados e de desvios

fundamentais de cada intervalo de tamanhos nominais são calculados a partir da média geométrica,  $D$  (ou  $d$ ), dos tamanhos nominais extremos,  $D_1$  e  $D_2$ , do intervalo considerado, ou seja  $D = \sqrt{D_1 \times D_2}$ , com tamanhos em mm, o que assegura uma evolução dos valores de  $D$  (ou  $d$ ) em progressão tendencialmente geométrica.

Os valores de tolerância normalizados (em  $\mu\text{m}$ ) correspondentes aos graus IT01, IT0 e IT1 são calculados a partir das seguintes expressões, para tamanhos nominais menores ou iguais a 500 mm:

$$\begin{array}{lll} \text{IT01} & \rightarrow & 0,3 + 0,008 D \\ \text{IT0} & \rightarrow & 0,5 + 0,012 D \\ \text{IT1} & \rightarrow & 0,8 + 0,020 D \end{array} \quad (6.4)$$

Os valores das tolerâncias normalizadas correspondentes aos graus IT5 a IT18, para tamanhos nominais menores ou iguais a 500 mm, são determinados em função do **fator de tolerância**,  $i$ . Este fator é calculado, em  $\mu\text{m}$ , a partir da seguinte expressão:

$$i = 0,45 \sqrt[3]{D} + 0,001 D \quad , \text{ com } D \text{ em mm} \quad (6.5)$$

Esta expressão foi estabelecida empiricamente, com base em diversas experiências nacionais, e tendo em conta que, para um mesmo processo de fabricação, a relação entre a amplitude dos desvios de fabricação e o tamanho nominal corresponde a uma função aproximadamente parabólica. O termo  $0,001 D$ , introduzido para atender à incerteza de medição (ocasionada pelas diferenças de temperatura e pelas deformações elásticas), na prática, só influencia as tolerâncias de tamanhos superiores a 80 mm (ver norma NP 189). Os valores das tolerâncias normalizadas são calculados em função do fator de tolerância,  $i$ , como se indica no quadro 6.9.

Deve notar-se que a partir de IT6, de 5 em 5 graus, os valores das tolerâncias normalizadas são multiplicados por 10 (a menos de IT6, no intervalo de tamanhos nominais de 3 a 6 mm, inclusive). Esta regra aplica-se a todas as tolerâncias normalizadas e pode servir para extrapolar os valores dos graus IT acima de IT18 (p. ex.  $\text{IT20} = \text{IT15} \times 10 = 640 i \times 10 = 6400 i$ ).

Deve também registrar-se que não existem quaisquer fórmulas indicadas para os graus IT2, IT3 e IT4. Os valores das tolerâncias normalizadas para esses graus foram escalonados em progressão geométrica entre os valores de IT1 e IT5, cuja razão,  $r$ , pode ser calculada através da expressão:

$$r = \sqrt[4]{\text{IT5} / \text{IT1}} \quad (6.6)$$

Para o cálculo das tolerâncias normalizadas para tamanhos nominais superiores a 500 mm, mas inferiores a 3150 mm, os valores das tolerâncias normalizadas correspondentes aos graus IT1 a IT18 são determinados em função do **fator de tolerância**,  $I$ . Este fator é calculado, em  $\mu\text{m}$ , a partir da seguinte expressão:

$$I = 0,004 D + 2,1 \quad , \text{ com } D \text{ em mm} \quad (6.7)$$

Quadro 6.9 – Fórmulas que permitem obter as tolerâncias normalizadas para os graus IT1 a IT18 (ISO 286-1:1988)

Tamanho nominal mm		Graus de tolerância normalizados																	
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Acima	Até, Inklus.	Fórmulas (resultados em micrometros)																	
-	500	-	-	-	-	7 <i>i</i>	10 <i>i</i>	16 <i>i</i>	25 <i>i</i>	40 <i>i</i>	64 <i>i</i>	100 <i>i</i>	160 <i>i</i>	250 <i>i</i>	400 <i>i</i>	640 <i>i</i>	1000 <i>i</i>	1600 <i>i</i>	2500 <i>i</i>
500	3150	2 <i>I</i>	2,7 <i>I</i>	3,7 <i>I</i>	5 <i>I</i>	7 <i>I</i>	10 <i>I</i>	16 <i>I</i>	25 <i>I</i>	40 <i>I</i>	64 <i>I</i>	100 <i>I</i>	160 <i>I</i>	250 <i>I</i>	400 <i>I</i>	640 <i>I</i>	1000 <i>I</i>	1600 <i>I</i>	2500 <i>I</i>

Na figura 6.51, pode observar-se a forma como o custo de fabricação aumenta, com a diminuição dos graus de tolerância normalizados (ou aumento da qualidade de fabricação). Deste facto, releva a importância de ajustar os requisitos de tolerância aos requisitos da função real.

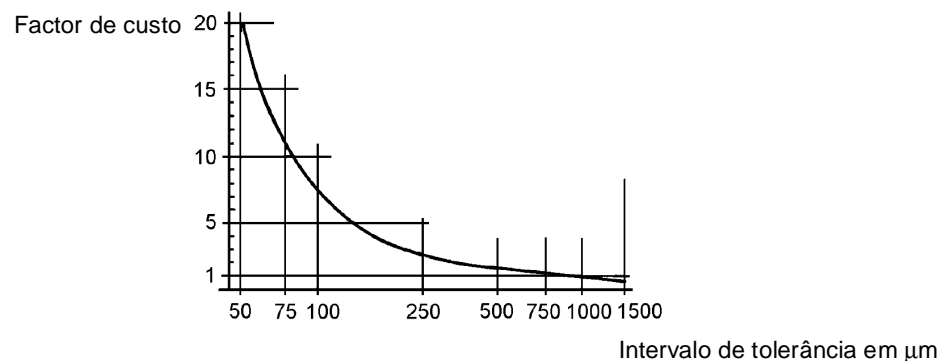
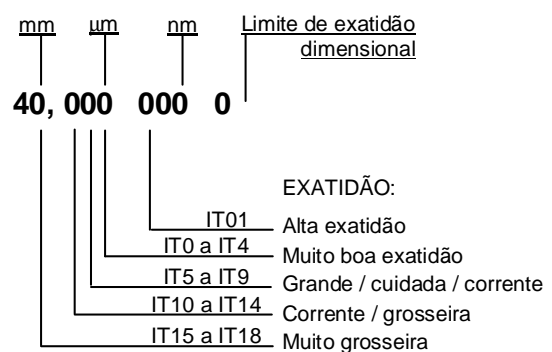


Figura 6.51 – Relação entre o intervalo de tolerância e o fator custo (Volvo STD 5061,101)

Em construção mecânica corrente, nos casos gerais, devem ser escolhidas as maiores tolerâncias (ou piores qualidades de fabricação) compatíveis com um correto funcionamento das peças a trabalhar [S6, M2 e NP 257]. No entanto, esta afirmação não deve fazer esquecer os efeitos da variação (tolerância) na qualidade final do produto. Taguchi, citado por Randel [R1], compreendeu e verificou o facto de qualquer desvio em relação ao valor alvo causar um custo quantificável ou uma perda. Na verdade, qualquer conceção trabalha melhor quando todos os seus elementos apresentam os seus valores alvos. As perdas podem traduzir-se em termos de desempenho, satisfação do cliente e eficiência da produção e do fornecedor.

O significado dos algarismos de um tamanho linear pode ser analisado a partir do seguinte exemplo, desenvolvido para o tamanho nominal 40 [S6].



Algumas relações entre os graus de tolerância, os seus domínios de aplicação e os métodos de fabricação, em condições normais, estão indicadas nos quadros 6.10 e 6.11, de acordo com a norma Volvo STD 5061,101. Relações idênticas podem também ser consultadas nas referências [S4 e L2].

Quadro 6.10 – Relações entre os graus de tolerância e os domínios de aplicação

Grau de tolerância	Domínio de aplicação dos graus de tolerância
IT1 a IT4	Tolerância das operações de maquina para dispositivos de medição fixos, tais como blocos-padrão, calibres-tampão, calibres-maxila, calibres de anel, calibres tampão e de anel para roscas.
IT5 a IT7	Tolerâncias de trabalho para ajustamentos com exatidão. Tolerâncias de fabricação para dispositivos de medição fixos destinados a peças com graus de tolerância IT11 a IT16.
IT8 a IT9	Tolerâncias de trabalho para ajustamentos requerendo uma exatidão relativamente elevada.
IT10 a IT11	Tolerâncias de trabalho para certos ajustamentos menos sensíveis. Tolerâncias de trabalho para peças em estádios de fabricação preparatórios.
IT12 a IT16	Tolerâncias de trabalho que não têm, necessariamente, qualquer relação com ajustamentos. Tolerâncias de trabalho para peças em estádios de fabricação preparatórios.

Quadro 6.11 – Relações aproximadas entre os graus de tolerância e os métodos de fabricação, em condições normais

Grau de tolerância	Exemplos de métodos de fabricação	
	Furos	Veios
IT1 a IT4	Operações de ajustamento de tamanhos.	
IT5	Operações de ajustamento de tamanhos.	Retificação.
IT6	Retificação, torneamento com diamante, alargamento de furos, furação com exatidão.	Retificação, torneamento com pastilha de diamante.
IT7	Retificação, torneamento em torno paralelo (de qualidade), alargamento de furos.	Retificação, torneamento em torno paralelo.
IT8	Torneamento, alargamento de furos, mandrilagem.	Torneamento.
IT9 a IT10	Torneamento com torno-revólver.	
IT11	Torneamento em máquina de fuso automático e árvore única, torneamento com torno-revólver.	
IT12 a IT14	Torneamento em máquina de fuso automático e árvore única.	
IT15 a IT18	Forjamento, estampagem e laminagem.	

O atual sistema ISO de tolerâncias apresenta vários condicionalismos, alguns deles atrás assinalados, que dificultam a sua integração em sistemas de CAD que incorporam módulos de otimização de tolerâncias, o que tem dado origem à elaboração de diversos trabalhos, neste âmbito, podendo referir-se, a título de exemplo, o sistema contínuo de tolerâncias desenvolvido por Lévesque [L1], considerado adequado para a otimização do toleranciamento de tamanhos de elementos não envolvidos em ajustamentos e que não necessitem de preencher o requisito de intermutabilidade.

#### 6.4.2.2 Posições do intervalo de tolerância

A **posição do intervalo de tolerância** (*"position of the tolerance interval"*), relativamente ao tamanho nominal é uma função do valor do tamanho nominal e é designada por **desvio fundamental**. Por conveniência, os desvios fundamentais não são definidos individualmente, para cada tamanho nominal específico, mas para intervalos de tamanhos nominais, indicados nos quadros 6.12 e 6.13.

#### 6.4.2.3 Desvios fundamentais

O **desvio fundamental** (*"fundamental deviation"*) é o desvio limite que define a posição do intervalo de tolerância, em relação ao tamanho nominal. Este desvio limite define o limite de tamanho que está mais próximo do tamanho nominal (ver figura 6.52, em que um furo é usado como exemplo).

**Legenda:**

- $D_n$  – Tamanho nominal  
 $ES$  – Desvio limite superior  
 $EI$  – Desvio limite inferior (neste caso, também, o desvio fundamental)  
 $D_{max}$  – Limite superior de tamanho  
 $D_{max} = D_n + ES$   
 $D_{min}$  – Limite inferior de tamanho  
 $D_{min} = D_n + EI$   
 $IT$  – Tolerância

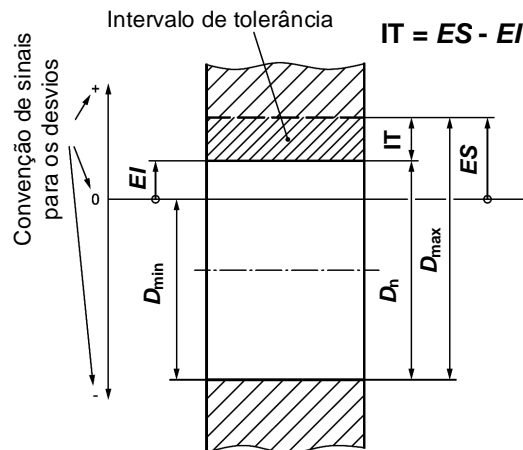


Figura 6.52 – Tamanho nominal, tamanhos e desvios limites superior e inferior e intervalo de tolerância. Adaptada da ISO 286-1

Os desvios fundamentais são algébricos, sendo identificados por (uma) letra(s) maiúscula(s) para **furos (A ... ZC)** ou (uma) letra(s) minúscula(s) para **veios (a ... zc)**, ver figura 6.53. Para evitar qualquer confusão na leitura das indicações no desenho, **não se utilizam as seguintes letras: I, i, L, l, O, o, Q, q, W, w**, na fixação dos **identificadores dos desvios fundamentais**.

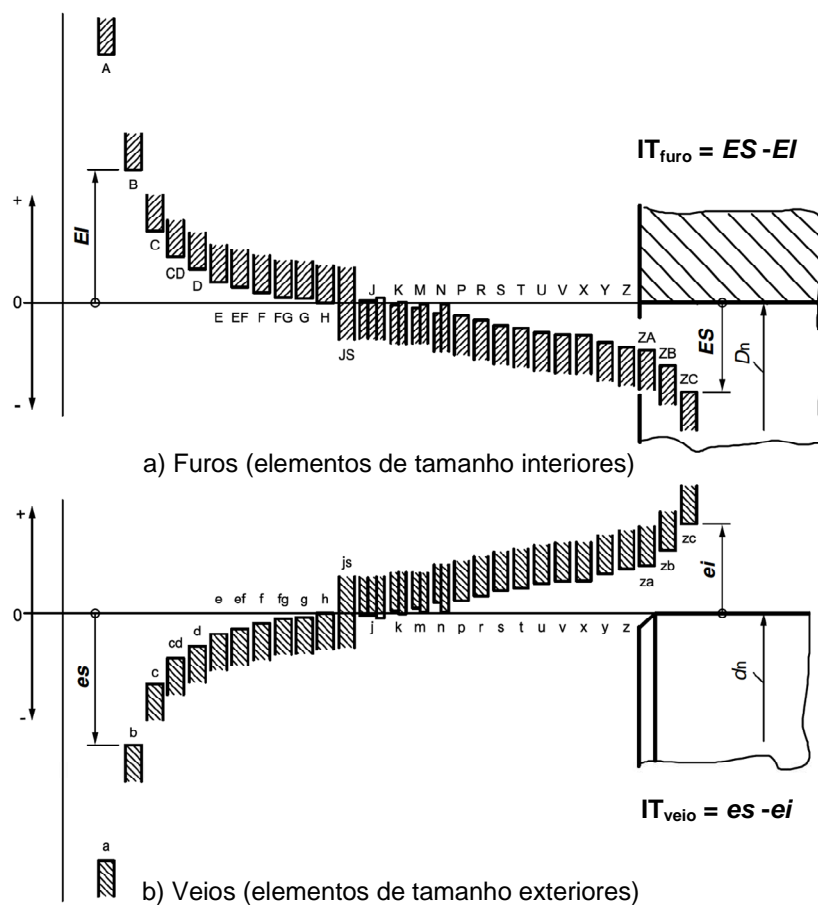


Figura 6.53 – Representação esquemática das posições do intervalo de tolerância (desvios fundamentais) em relação ao tamanho nominal

[illegible]

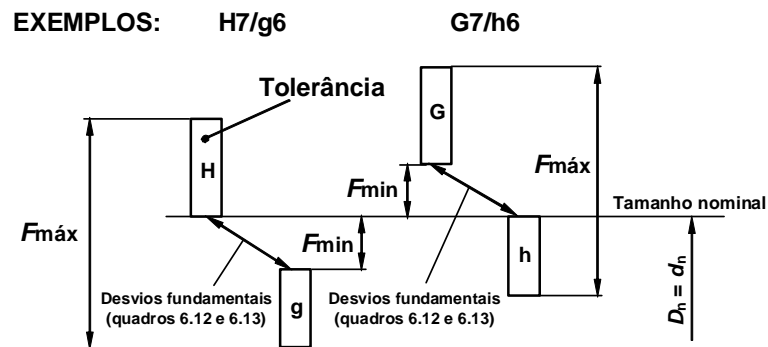


Notas relativas ao quadro 6.12 (desvios fundamentais de furos):

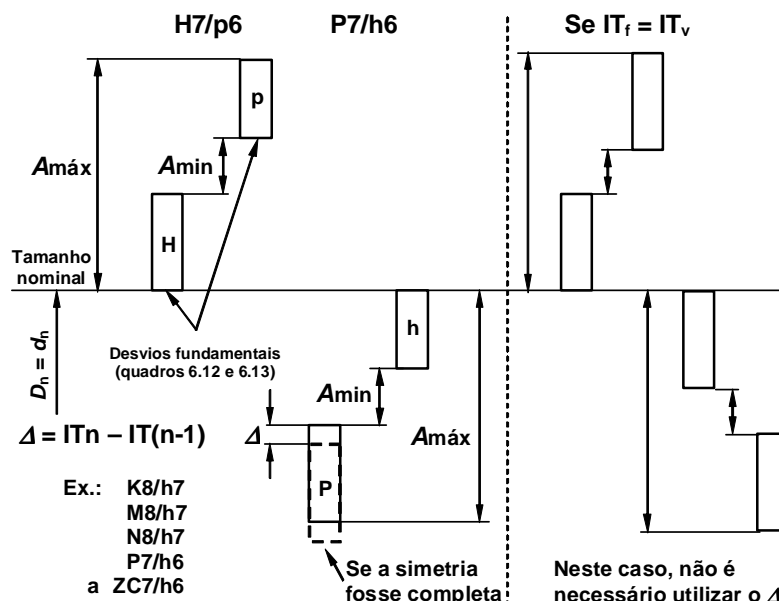
- 1) Os desvios fundamentais **A** e **B** não devem ser utilizados para tamanhos nominais  $\leq 1$  mm.
- 2) Para determinar os valores dos desvios **K**, **M**, **N**, para graus de tolerância até IT8 (inclusive), e de **P** a **ZC**, até IT7 (inclusive), os **valores  $\Delta$** , indicados nas colunas da direita, devem ser adicionados aos valores dos desvios respectivos indicados no quadro. Esta regra aplica-se para que, nos ajustamentos de furo normal ou de veio normal (ver secção 6.4.3.4), em tamanhos nominais superiores a 3 mm, se um furo de um dado grau de tolerância for associado com um veio de um grau de tolerância mais fino, imediatamente superior, (p. ex.: H7/p6 e P7/h6), ambos os ajustamentos possam ter exatamente os mesmos limites de folga e/ou aperto (ver justificação gráfica na figura 6.54) de modo que ambos possam assegurar uma mesma função especificada. Nestes casos, os **ajustamentos designam-se de funcionalmente equivalentes**.
- 3) Em casos especiais, para a classe de tolerância **M6**, no intervalo acima de 250 até 315 mm, inclusive,  $ES = -9 \mu\text{m}$  (em vez de  $-11 \mu\text{m}$ , de acordo com o cálculo).
- 4) O desvio fundamental **N**, para graus de tolerância acima de IT8, não deve ser utilizado para tamanhos nominais  $\leq 1$  mm.

Os desvios **CD**, **EF** e **FG** são utilizados, apenas, em mecânica fina e relojoaria (ver norma ISO 286-2).

Os desvios **ZA**, **ZB** e **ZC** são utilizados em ajustamentos com grandes apertos [M1].



a) Com as posições das tolerâncias do “furo” e do “veio” em lados opostos à linha do tamanho nominal, existe equivalência funcional entre os ajustamentos nos sistemas de “furo normal” e de “veio normal”



Nestes casos, é necessária a adição do valor  $\Delta$  para garantir a equivalência funcional dos ajustamentos, nos sistemas de “furo normal” e de “veio normal”

b) Com posições do “furo” e do “veio” do mesmo lado, em relação ao tamanho nominal

Figura 6.54 – A justificação da utilização dos valores  $\Delta$ , incluídos no quadro 6.12, na determinação dos desvios fundamentais para furos

Quadro 6.13 – Valores dos desvios fundamentais de veios (μm) (ISO 286-1)

Tamanho nominal mm		Valores dos desvios fundamentais (µm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Desvio superior - es													Desvio inferior - el																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Todos os graus de tolerância normalizados													Todos os graus de tolerância normalizados																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		a <sup>1)</sup>	b <sup>1)</sup>	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js	IT5 e IT6	IT7	IT8	IT9 a IT9	s IT3 e IT7	k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Acima	Incluindo	3	6	10	14	18	24	30	40	50	65	80	100	120	140	160	180	200	225	250	280	315	355	400	450	500	560	630	710	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000	2240	2500	2800	3150																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
-	-	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+20	+26	+32	+40	+60	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4</

Notas relativas ao quadro 6.13 (desvios fundamentais de veios):

<sup>1)</sup> Os desvios fundamentais **a** e **b** não devem ser utilizados para tamanhos nominais  $\leq 1$  mm.

Os desvios **cd**, **ef** e **fg** são utilizados, apenas, em mecânica fina e relojoaria (ver norma ISO 286-2).

Os desvios **za**, **zb** e **zc** são utilizados em ajustamentos com grandes apertos [M1].

Os desvios limites superiores (**ES** e **es**) e os desvios limites inferiores (**EI** e **ei**), para furos e veios são estabelecidos a partir dos respectivos desvios fundamentais e das tolerâncias normalizadas (**IT**), conforme se indica nas figuras 6.53 a) e 6.53 b).

O conceito de desvios fundamentais não se aplica aos identificadores **JS** e **js**, uma vez que os seus limites de tolerância são distribuídos simetricamente em relação à linha de tamanho nominal, e aos desvios fundamentais **J** e **j**, que são, na sua maior parte, distribuições assimétricas da tolerância normalizada em relação à linha do tamanho nominal (o tamanho limite mais próximo do tamanho nominal não está fixado). O valor do desvio fundamental é independente do grau de tolerância escolhido, exceptuando os casos dos furos **JS** e **J** e dos veios **js** e **j** em que não se pode falar, propriamente, em desvio fundamental.

#### 6.4.2.4 Classe de tolerância

A **Classe de tolerância** (*"tolerance class"*) é o termo utilizado para designar uma combinação de um desvio fundamental e de um grau de tolerância. Contém informação sobre a magnitude da tolerância e sobre a posição do intervalo de tolerância em relação ao tamanho nominal do elemento de tamanho. A magnitude da tolerância é uma função do número do grau de tolerância normalizado e do tamanho nominal do elemento normalizado.

O **identificador da classe de tolerância** é constituído por (uma) letra(s) maiúscula(s) para furos e por (uma) letra(s) minúscula(s) para veios, que identificam o desvio fundamental, seguido do número representando o grau de tolerância normalizado, tal como, por exemplo, **D13** (para furos) e **h9** (para veios).

Um **tamanho toleranciado** deve ser designado pelo tamanho nominal seguido pela designação da classe de tolerância requerida ou pela tolerância dada, explicitamente, pelos desvios limites + e/ou –, conforme se indica nos exemplos seguintes:

$$\begin{array}{ccccccc} +0,025 & & +0,025 & & -0,012 & & 0 \\ 32 \text{ H7} = 32 \text{ } 0 & ; & 90 \text{ U6} = 90 -0,071; & 80 \text{ js15} = 80 \pm 0,6; & 100 \text{ g6} = 100 -0,034; & 40 \text{ h6} = -0,016 \end{array}$$

#### 6.4.2.5 Seleção de classes de tolerância

O sistema ISO de tolerâncias e de ajustamentos dá a possibilidade de se fazer uma escolha muito ampla entre as várias classes de tolerância (ver quadros 6.12 e 6.13), mesmo se essa escolha for

limitada às classes indicadas na parte 2 da norma ISO 286. **Ao restringir as possibilidades na seleção de classes de tolerância, pode evitar-se uma multiplicidade desnecessária de ferramentas e calibres.**

Deste modo, sempre que possível, as **classes de tolerância** deverão ser escolhidas dentre as correspondentes às classes para furos e veios indicadas, respetivamente, nas figuras 6.55 e 6.56, e a **primeira escolha** deverá ser feita, preferencialmente, a partir das classes de tolerância apresentadas circunscritas por linhas a traço contínuo grosso. Se necessário, para uma aplicação específica, os desvios **JS** e **js** podem ser substituídos pelos correspondentes desvios **J** e **j**.

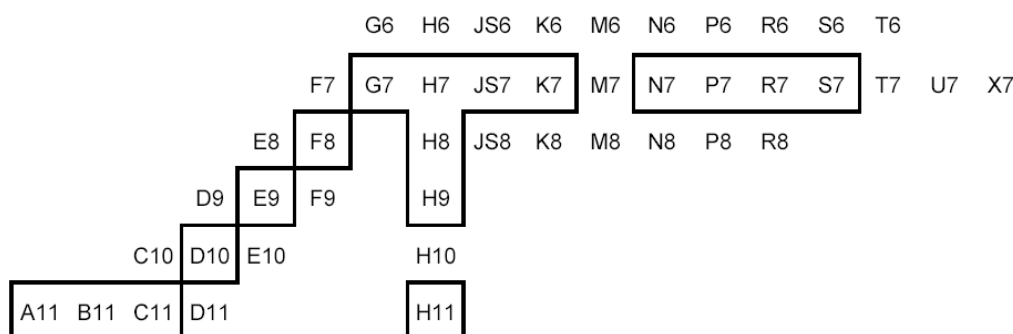


Figura 6.55 – Seleção de classe de tolerância para furos (ISO 286-1)

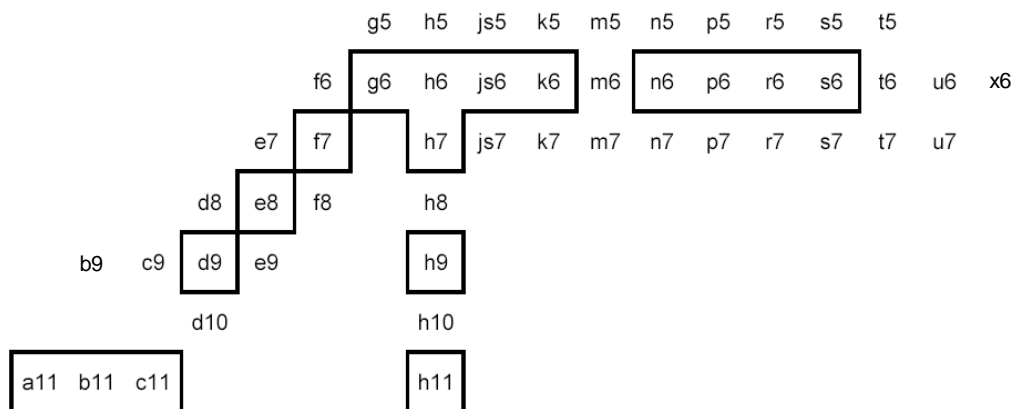


Figura 6.56 – Seleção de classes de tolerância para veios (ISO 286-1)

As classes de tolerância indicadas, nas figuras 6.55 e 6.56, aplicam-se apenas em “**aplicações correntes**” (excluindo, portanto, a mecânica fina e a relojoaria), que não requerem uma seleção de classes de tolerância mais específica (p. ex. como no caso particular de enchavetamentos livres, em que se utilizam ajustamentos entre as chavetas paralelas e os escatéis dos furos e dos veios com classes P9/h9, JS9/h9, N9/h9, etc.).

A comparação das classes de tolerância propostas na ISO 286-1:2010 com as indicadas na anterior norma ISO 1829:1975, entretanto anulada, permite registrar um aumento ligeiro das possibilidades de escolha das classes de tolerância preferenciais para “aplicações correntes”.

### 6.4.3 Sistema ISO de ajustamentos

Um **ajustamento** (*"fit"*) é uma relação entre um elemento de tamanho (*"feature of size"*) interior (o "furo") e um exterior (o "veio") que se destinam a ser montados. A pré-condição para a aplicação do sistema de codificação ISO de tolerâncias para tamanhos lineares de elementos constituintes de um ajustamento é a de que **os tamanhos nominais do furo e do veio devem ser idênticos**. Os conceitos desta secção do texto dizem respeito apenas a elementos de tamanho nominais (de forma perfeita).

A designação de um ajustamento entre elementos conjugados deve incluir:

- o tamanho nominal comum;
- a classe de tolerância para o furo;
- a classe de tolerância para o veio.

tal como, por exemplo:  $\varnothing 52 \text{ H7/g6 } \textcircled{\text{E}}$  ou  $\varnothing 52 \frac{\text{H7}}{\text{g6}} \textcircled{\text{E}}$

#### 6.4.3.1 Tipos de ajustamentos

Os ajustamentos entre elementos de peças conjugadas podem ser realizados com folga, com aperto ou serem incertos.

##### 6.4.3.1.1 Ajustamentos com folga

A folga (*"clearance"*) é a diferença entre os tamanhos do furo e do veio, quando o tamanho do veio é menor do que o tamanho do furo. **Por definição, os valores das folgas são positivos.**

Um ajustamento com folga (*"clearance fit"*) é um ajustamento que proporciona sempre uma folga entre o furo e o veio, quando montados, ou seja, o limite inferior de tamanho do furo é maior ou, no limite, igual ao limite superior de tamanho do veio (ver figura 6.57).

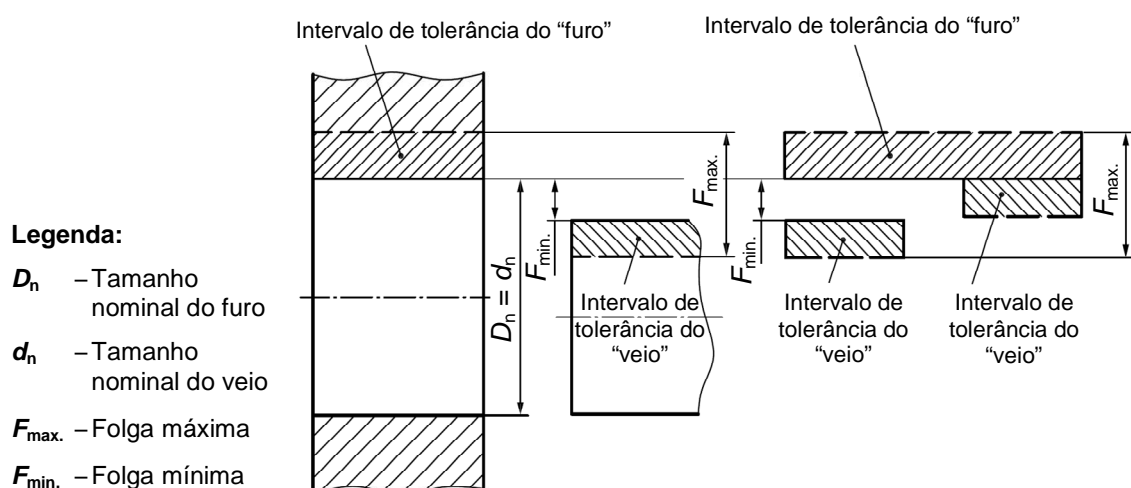


Figura 6.57 – Representação esquemática de um ajustamento com folga. Adaptada da ISO 286-1

A **folga mínima**, num ajustamento com folga, é a diferença entre o limite inferior de tamanho do furo e o limite superior de tamanho do veio:

$$F_{\min.} = D_{\min.} - d_{\max.} = EI - es \quad (6.8)$$

A **folga máxima**, num ajustamento com folga, é a diferença entre o limite superior de tamanho do furo e o limite inferior de tamanho do veio:

$$F_{\max.} = D_{\max.} - d_{\min.} = ES - ei \quad (6.9)$$

#### 6.4.3.1.2 Ajustamentos com aperto

O aperto (ou interferência – “*interference*”) é a diferença, antes do acoplamento, entre os tamanhos do furo e do veio, quando o tamanho do veio é maior do que o tamanho do furo. **No cálculo de um aperto, os valores da diferença obtidos são negativos.**

Um ajustamento com aperto (“*interference fit*”) é um ajustamento que proporciona sempre um aperto entre o furo e o veio, quando montados, ou seja, o limite superior de tamanho do furo é menor ou, no limite, igual ao limite inferior de tamanho do veio (ver figura 6.58).

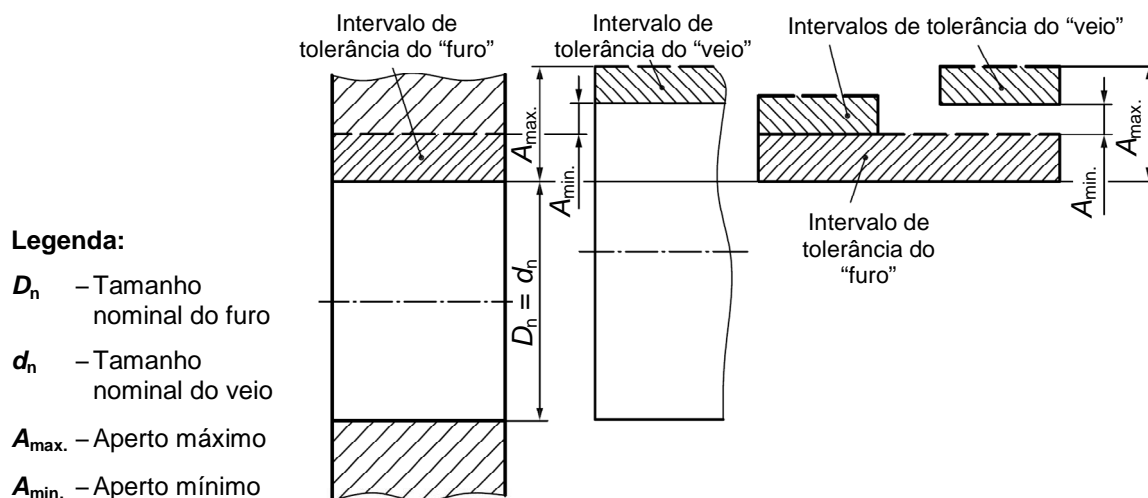


Figura 6.58 – Representação esquemática de um ajustamento com aperto (ou interferência). Adaptada da ISO 286-1

O **aperto mínimo**, num ajustamento com aperto, é a diferença entre o limite superior de tamanho do furo e o limite inferior de tamanho do veio:

$$A_{\min.} = | D_{\max.} - d_{\min.} | = | ES - ei | = ei - ES \quad (6.10)$$

O **aperto máximo**, num ajustamento com aperto, é a diferença entre o limite inferior de tamanho do furo e o limite superior de tamanho do veio:

$$A_{\max.} = | D_{\min.} - d_{\max.} | = | EI - es | = es - EI \quad (6.11)$$

### 6.4.3.1.3 Ajustamentos incertos

Um ajustamento incerto (ou de transição – “*transition fit*”) é um ajustamento que poderá proporcionar uma folga ou um aperto entre o furo e o veio, quando montados, (ver figura 6.59). Os intervalos de tolerância do furo e do veio sobrepõem-se, assim, completamente ou apenas em parte; por isso, a existência de uma folga ou de um aperto depende dos tamanhos reais (tamanhos dos elementos de tamanho integrais associados) do furo e do veio.

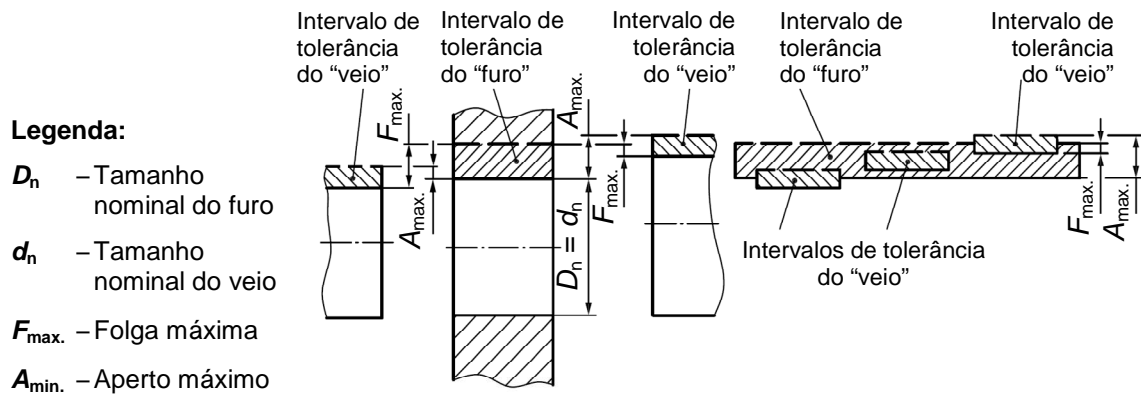


Figura 6.59 – Representação esquemática de um ajustamento incerto (ou de transição). Adaptada da ISO 286-1

A **folga máxima**, num ajustamento incerto, é a diferença entre o limite superior de tamanho do furo e o limite inferior de tamanho do veio:

$$F_{\max.} = D_{\max.} - d_{\min.} = ES - ei \quad (6.12)$$

O **aperto máximo**, num ajustamento incerto, é a diferença entre o limite inferior de tamanho do furo e o limite superior de tamanho do veio:

$$A_{\max.} = | D_{\min.} - d_{\max.} | = | EI - es | = es - EI \quad (6.13)$$

### 6.4.3.2 Amplitude de um ajustamento

A **amplitude de um ajustamento** (“*span of a fit*”), anteriormente denominada de “tolerância de ajustamento”, é a soma aritmética das tolerâncias dimensionais dos dois elementos de tamanho constituintes do ajustamento:

$$T_{aj} = IT_{\text{furo}} + IT_{\text{veio}} \quad (6.14)$$

A amplitude de um ajustamento é um valor absoluto, sem sinal, e expressa a variação nominal possível do ajustamento. A amplitude de um ajustamento com folga ou com aperto pode, também, ser definida, respetivamente, como a diferença entre as folgas ou apertos máximo e mínimo. Por sua vez, a amplitude de um ajustamento incerto pode ser definida como a soma da folga máxima com o aperto máximo (ver figura 6.60).

$$\begin{aligned}
 T_{aj} &= F_{\max.} - F_{\min.} && \text{, no caso de ajustamentos com folga;} \\
 T_{aj} &= A_{\max.} - A_{\min.} && \text{, no caso de ajustamentos com aperto;} \\
 T_{aj} &= F_{\max.} + A_{\max.} && \text{, no caso de ajustamentos incertos.}
 \end{aligned}
 \tag{6.15}$$

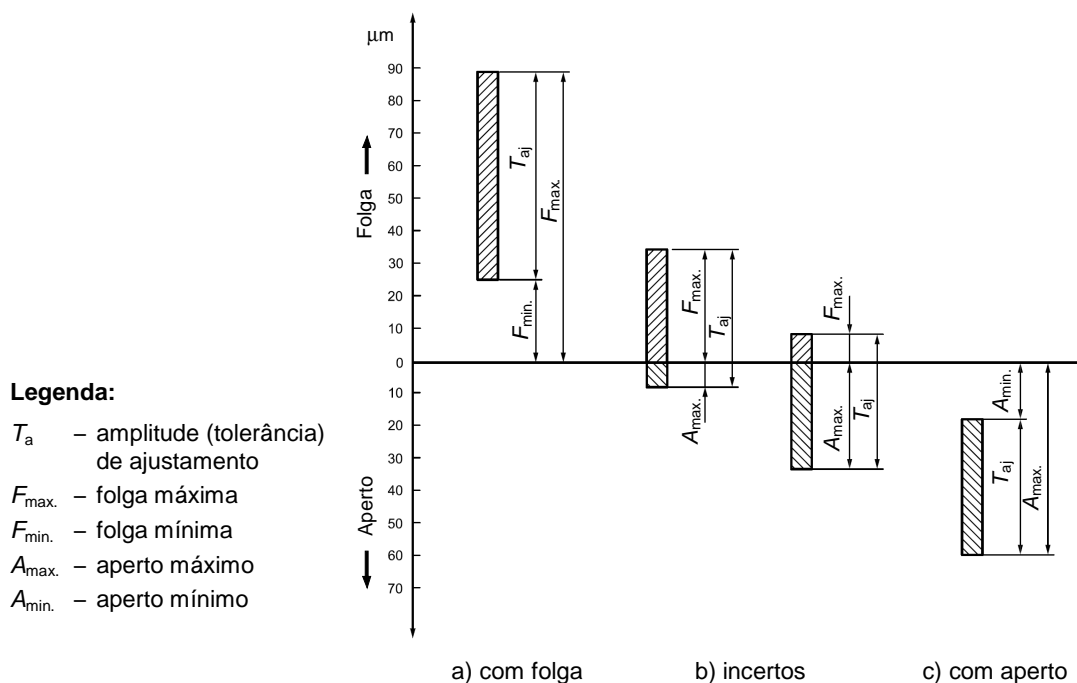


Figura 6.60 – Exemplos de amplitudes (tolerâncias) de ajustamentos. Adaptada da ISO 286-1

### 6.4.3.3 A importância dos valores médios das folgas e apertos

Na fabricação de peças em pequenas séries, o operador procurará efetuar o seu trabalho com o menor desvio possível em relação ao valor médio do intervalo de tolerância. Nestes casos, considera-se que a variável “tamanho” segue uma “distribuição uniforme”, com uma função densidade de probabilidade “retangular”. A frequência de ocorrência de todos os valores dos tamanhos, compreendidos no intervalo de tolerância, é a mesma e, fora desse intervalo, é nula [M2].

Na fabricação de peças em grandes séries, regista-se sempre uma maior ou menor dispersão nos valores obtidos, em cada uma das peças, correspondentes a uma dada dimensão (“tamanho”) inscrita no respetivo desenho. Essa dispersão pode ter origem, entre outros, nos seguintes fatores de influência da exatidão dos diferentes métodos de fabricação:

- desgaste progressivo da ferramenta de corte,
- sistemas de medição utilizados,
- folgas inerentes aos sistemas mecânicos da máquina-ferramenta,
- deformação elástica dos órgãos mecânicos da máquina,
- vibrações da máquina-ferramenta,



- deficiente fixação da peça,
- efeitos térmicos derivados da temperatura ambiente e da temperatura da peça a trabalhar,
- tensões de trabalho,
- etc.

Quando as tolerâncias são estabelecidas, os limites resultantes representam o que se exige da fabricação, a fim de serem satisfeitas as condições funcionais e de intermutabilidade. A dispersão dos valores dimensionais obtidos é, em geral, caracterizada pelo seu valor médio e respetivo desvio-padrão ( $\sigma$ ).

Sempre que uma variável aleatória (por exemplo, o valor real de um tamanho) resulta da soma de um grande número de efeitos provocados por causas independentes, em que o efeito de cada uma das causas é negligenciável em relação à soma de todos os outros efeitos, então essa variável segue aproximadamente uma **Distribuição Normal ou de Gauss**. Esta distribuição tem uma função densidade de probabilidade do tipo das representadas na figura 6.61, sendo simétrica em torno do valor médio. Deste modo, na generalidade dos casos, desde que o processo de fabricação esteja convenientemente regulado, a maior percentagem de peças trabalhadas apresenta valores dimensionais próximos dos respetivos valores médios, pelo que, na determinação dos ajustamentos, deve também ter-se em consideração os valores da **folga média** e do **aperto médio**.

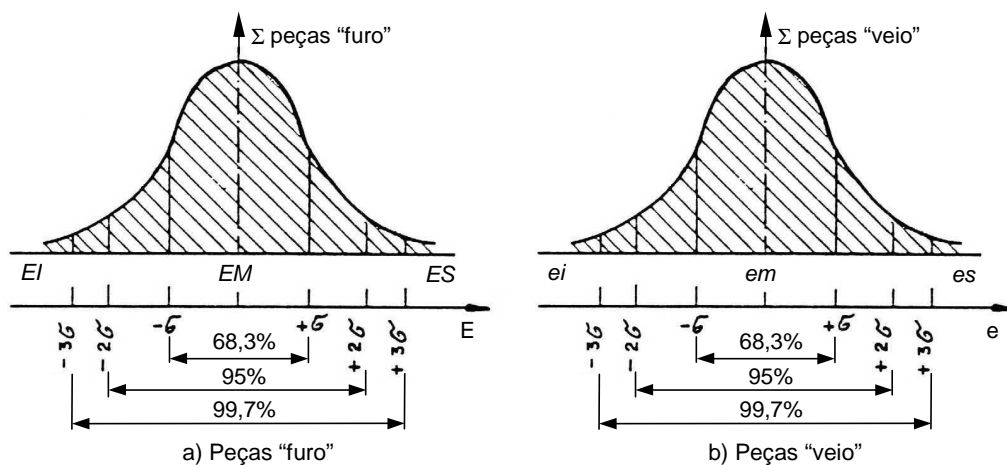


Figura 6.61 – Exemplos de distribuições dos desvios dimensionais em dimensões de peças “furo” e peças “veio”

Deste modo, de acordo com o caso em apreço, as condições de ajustamento podem ser expressas através de uma das seguintes expressões:

$$\begin{aligned} \begin{cases} F_{\max} \\ F_{\min} \end{cases} &= F_{\text{med}} \pm T_{\text{aj}} / 2 && \text{, para ajustamentos com folga,} \\ \\ \begin{cases} A_{\max} \\ A_{\min} \end{cases} &= A_{\text{med}} \pm T_{\text{aj}} / 2 && \text{, para ajustamentos com aperto,} \\ \\ \begin{cases} F_{\max} \\ A_{\max} \end{cases} &= (F \text{ ou } A)_{\text{med}} \pm T_{\text{aj}} / 2 && \text{, para ajustamentos incertos} \end{aligned} \quad (6.16)$$

#### 6.4.3.4 Determinação de um ajustamento normalizado

Existem dois modos para determinar um ajustamento. Através da experiência anteriormente adquirida ou por meio do cálculo das folgas e/ou apertos admissíveis, derivados dos requisitos funcionais e das possibilidades de fabricação das peças conjugadas.

##### 6.4.3.4.1 Recomendações práticas para a seleção de um ajustamento

Existem outras características, para além dos tamanhos das peças conjugadas e das suas tolerâncias, que influenciam a função de um ajustamento. Com vista a dar uma definição técnica completa de um ajustamento, devem ser tidos em consideração outros fatores de influência [A3, C7, M2], tais como, por exemplo:

- os desvios de forma, de orientação e de posição;
- os estados das superfícies em contacto;
- as densidades das matérias constituintes das peças conjugadas;
- o comprimento de contacto entre as peças conjugadas;
- as temperaturas de funcionamento;
- os tratamentos térmicos e matérias constituintes das peças conjugadas;
- a lubrificação das superfícies em contacto;
- as temperaturas de funcionamento;
- etc.

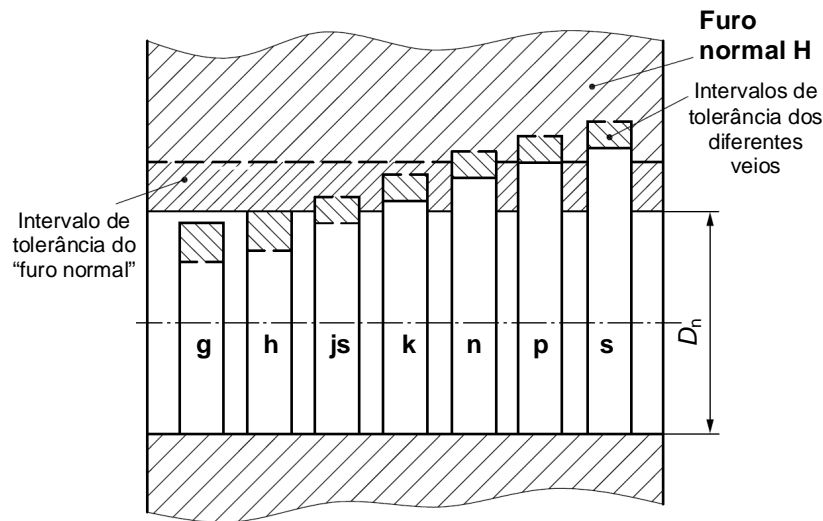
##### 6.4.3.4.2 Seleção do sistema de ajustamentos

O sistema ISO de ajustamentos engloba furos e veios toleranciados através do sistema ISO de tolerâncias para tamanhos lineares. Com vista a reduzir ainda mais o número de ferramentas de fabricação e de calibres de verificação necessários para uma produção corrente, a ISO começou por basear a escolha dos ajustamentos em dois sistemas principais: o “**sistema de ajustamentos de furo normal**” (furo H) e o “**sistema de ajustamentos de veio normal**” (veio h). No processo de seleção de um ajustamento, a adoção de um destes sistemas deve ser a primeira decisão a tomar.

O **sistema de ajustamentos de furo normal (ou furo base)** engloba todos os ajustamentos em que o desvio fundamental do furo é igual a zero, ou seja, o desvio limite inferior é  **$EI = 0$** , (ver figura 6.62). Neste sistema, o limite inferior de tamanho do furo é idêntico ao tamanho nominal. As folgas ou apertos requeridos são obtidos através da combinação entre veios com várias classes de tolerância e “furos normais”, H, com uma classe de tolerância em que  $EI = 0$ .

O **sistema de ajustamentos de veio normal (ou veio base)** engloba todos os ajustamentos em que o desvio fundamental do veio é igual a zero, ou seja, o desvio limite superior é  **$es = 0$** , (ver figura 6.63). Neste sistema, o limite superior de tamanho do veio é idêntico ao tamanho nominal. As folgas

ou apertos requeridos são obtidos através da combinação entre furos com várias classes de tolerância e “veios normais”,  $h$ , com uma classe de tolerância em que  $es = 0$ .



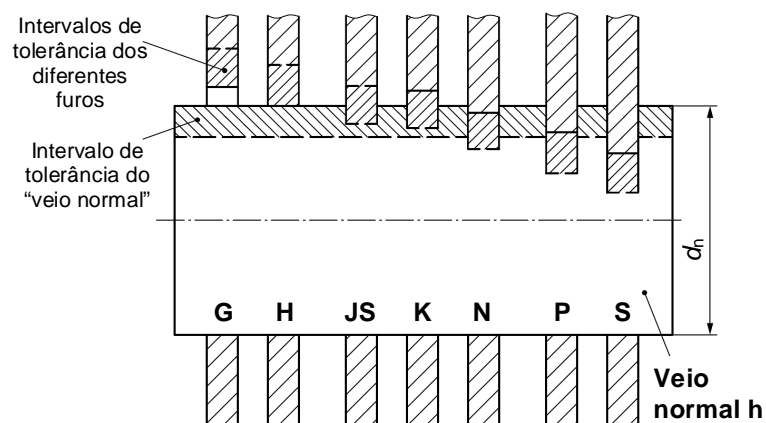
As linhas contínuas horizontais representam os desvios fundamentais para um “furo normal” e veios diferentes. As linhas a traço interrompido, que limitam os intervalos de tolerância, representam os outros desvios limites. Mostra-se a possibilidade de diferentes combinações entre um “furo normal” e veios diferentes, relacionadas com os seus graus de tolerância normalizados (p. ex.: H7/h6, H6/js5, H6/p5).

Figura 6.62 – Sistema de furo normal (ou furo base) de ajustamentos. Adaptada da ISO 286-1

No entanto, deve ser registado que não existem diferenças técnicas, entre os dois sistemas, em termos da funcionalidade das ligações das peças. Assim, **a escolha do sistema deverá ser baseada em razões económicas**. Em aplicações correntes, sobretudo, na fabricação de peças isoladas e na fabricação de pequenas e médias séries de mecanismos pouco complexos (ver norma NP 257), é preferível escolher o “**sistema de ajustamentos de furo normal**”, o que evita uma multiplicidade desnecessária de ferramentas (p. ex. mandris) e calibres [C7, L2]. A experiência tem demonstrado que, em termos gerais, o “sistema de furo normal” é adotado nas principais indústrias metalomecânicas (automóvel, aeronáutica e de máquinas-ferramenta) [M1, N3].

O “**sistema de ajustamentos de veio normal**” deverá ser utilizado, apenas, se trouxer vantagens económicas inquestionáveis [por exemplo, onde seja necessário poder montar várias peças, com furos que têm diferentes desvios, num único veio construído a partir de varão de aço calibrado, disponível no mercado com classes de tolerância h6, h7, (h8), h9, (h10) ou h11, que não necessita de ser sujeito a posteriores operações de corte por arranque de apara, ver EN 10278]. Este sistema é utilizado, predominantemente, na construção de veios de transmissão e eixos de êmbolos com ajustamentos múltiplos, máquinas agrícolas, de construção, têxteis e de elevação [M1, L2, N3].

Nas fabricações em grandes séries, em que se torna possível efetuar uma amortização relativamente rápida de ferramentas e calibres, a vantagem económica do “sistema de furo normal” esbate-se ou até desaparece [C7]. Em tais casos, é corrente adotar mesmo um “sistema misto”, utilizando, em simultâneo, ajustamentos de furo normal, para certos acoplamentos, e ajustamentos de veio normal, para outros, como, por exemplo, na construção de máquinas elétricas e em construções de precisão [N3].



As linhas contínuas horizontais representam os desvios fundamentais para um "veio normal" e furos diferentes. As linhas a traço interrompido, que limitam os intervalos de tolerância, representam os outros desvios limites. Mostra-se a possibilidade de diferentes combinações entre um "veio normal" e furos diferentes, relacionadas com os seus graus de tolerância normalizados (p. ex.: h6/G7, h6/H7, h6/P7).

Figura 6.63 – Sistema de veio normal (ou veio base) de ajustamentos. Adaptada da ISO 286-1

No entanto, a denominação de um ajustamento do **"sistema misto"** é utilizada, fundamentalmente, para designar um ajustamento em que nem a posição do furo é H nem a do veio é h. Este tipo de ajustamentos utiliza-se quando os sistemas de "furo normal" ou de "veio normal" – que são funcionalmente equivalentes – embora aceitáveis, não satisfazem exatamente as condições impostas ou então nenhum daqueles ajustamentos conduz a resultados suficientemente próximos do especificado em termos funcionais [M2, L2].

#### 6.4.3.4.3 Escolha de um ajustamento específico com base na experiência

Os graus de tolerância e os desvios fundamentais (posições do intervalo de tolerância) deverão ser, pois, escolhidos para o "furo" e para o "veio", de modo a garantirem as correspondentes folgas e/ou apertos mínimos e máximos que melhor satisfaçam as condições de utilização requeridas.

As tolerâncias escolhidas deverão ser as mais largas, compatíveis com as condições de utilização [S6, M2 e NP 257]. Em termos gerais, as "qualidades de fabricação" (graus de tolerância normalizados) dos elementos das peças a ajustar deveriam ser iguais. No entanto, **como, para tamanhos correntes, é mais difícil conseguir obter uma dada tolerância para um furo do que para um veio de igual tamanho** (p. ex. a retificação de superfícies interiores é mais trabalhosa e, logo, mais cara do que igual operação em superfícies exteriores), **frequentemente, em ajustamentos de responsabilidade (ajustamentos com pequenas folgas ou com aperto) deve atribuir-se ao furo um grau de tolerância mais grosseiro, em uma unidade, do que o estipulado para o veio, de modo a equilibrar os custos de produção das peças** (p. ex. **H8/f7** ou **F8/h7**) [S6, C7, M2].

No entanto, para fins de engenharia corrente normal, apenas é requerido um número pequeno dos muitos ajustamentos possíveis. As figuras 6.64 e 6.65 indicam, respetivamente, esses **ajustamentos recomendados**, no "sistema de furo normal" e no "sistema de veio normal" que se verifica

satisfazerem muitas das necessidades de uma organização típica de engenharia. No entanto, por razões económicas, a primeira escolha para um ajustamento deverá ser feita, sempre que possível, a partir das classes de tolerância cujos códigos estão indicados circunscritos por linhas a traço contínuo grosso (**ajustamentos preferenciais**).

Furo normal	Classes de tolerância para veios													
	Ajustamentos com folga				Ajustam. incertos				Ajustamentos com aperto					
H 6				g5	h5	js5	k5	m5	n5	p5				
H 7				f6	g6	h6	js6	k6	m6	n6	p6	r6	s6	t6 u6 x6
H 8			e7	f7		h7	js7	k7	m7			s7		u7
			d8	e8	f8	h8								
H 9			d8	e8	f8	h8								
H10	b9	c9	d9	e9		h9								
H 11	b11	c11	d10			h10								

**Nota:** De acordo com os ITs adotados, os ajustamentos **H/n**, **H/p** e **H/r**, podem ser com aperto ou incertos.

Figura 6.64 – Ajustamentos recomendados do “sistema furo normal”. Adaptada da ISO 286-1

Deve ser assinalado que alguns ajustamentos incertos designados na literatura como “ligeiramente presos” (H/js ou JS/h) e “moderadamente presos” (H/k ou K/h), quando analisados apenas em termos de acoplamentos entre elementos de tamanho de “forma perfeita”, apresentam pequenas folgas médias,  $F_{med.}$ . A caracterização destes ajustamentos como “presos” é potenciada pelos efeitos adicionais provocados pelos desvios de forma dos elementos conjugados que contribuem para dificultar a sua possibilidade de movimentação.

Veio normal	Classes de tolerâncias para furos												
	Ajustamentos com folga				Ajustam. incertos				Ajustamentos com aperto				
h 5	G6 H6				JS6 K6 M6				N6 P6				
<b>h 6</b>	F7 <b>G7 H7</b>				<b>JS7 K7</b> M7 <b>N7</b>				<b>P7 R7 S7</b> T7 U7 X7				
<b>h 7</b>	E8 <b>F8</b>				<b>H8</b>								
h 8	D9 E9 F9				H9								
<b>h 9</b>	E8 <b>F8</b>				<b>H8</b>								
	D9 <b>E9</b> F9				<b>H9</b>								
	<b>B11</b> C10 <b>D10</b>	H10											

**Nota:** De acordo com os ITs adotados, os ajustamentos **N/h**, **P/h** e **R/h**, podem ser com aperto ou incertos.

Figura 6.65 – Ajustamentos recomendados do “sistema veio normal”. Adaptada da ISO 286-1

Em termos das “**qualidades dos ajustamentos**”, estes podem também ser classificados em “de exatidão” (H6/w5 ou W6/h5), “cuidados” (H7/w6 ou W7/h6), “correntes” (H8/w7 e H9/w8 ou W8/h7 e W9/h8) e “grosseiros” (H10/w9 e H11/w11 ou W9/h9 e W11/h9),

Em diversa literatura da especialidade, para aplicações correntes, encontram-se inúmeros quadros com exemplos de ajustamentos recomendados, incluindo informação adicional sobre a classificação dos ajustamentos (livre, rotativo, deslizante, deslizante justo, ligeiramente preso, moderadamente preso, etc.), a descrição das suas principais características, o seu modo de montagem e alguns exemplos das suas aplicações mais correntes [A3, S6, S4, C3, F1, L2, M2, M1 e N3]. Complementarmente, existem vários programas informáticos, atualmente disponíveis no mercado, com o objetivo de facilitar o processo de seleção de ajustamentos normalizados com as folgas e/ou apertos pretendidos, do género do apresentado na referência [B2].

### 6.4.3.4.4 Determinação de um ajustamento específico através de cálculo

As recomendações contidas nas secções anteriores são válidas para a maioria dos problemas correntes. No entanto, em certos casos funcionais especiais, as decisões de conceção não devem basear-se apenas naquelas indicações.

Nos casos de produção de peças em grandes séries, pode ser importante escolher convenientemente as características de cada um dos seus elementos que determinam um ajustamento, uma vez que o custo das peças dependerá das operações de trabalho mecânico necessárias para a sua materialização. O mesmo se passa em trabalhos de grande responsabilidade que exijam ensaios prévios com protótipos das peças conjugadas.

Nestes casos, é necessário calcular as folgas e/ou apertos derivados dos requisitos funcionais das peças conjugadas. As folgas e/ou apertos e a amplitude de ajustamento obtidas a partir desse cálculo devem ser convertidas em desvios limites e, se possível, em classes de tolerância ISO para “furos” e para “veios”.

**Nos ajustamentos com folga**, geralmente, é a folga média pretendida à temperatura de funcionamento – a “folga média de conceção”,  $F_{med.c}$  – que deverá servir de base à escolha do ajustamento. No entanto, em cada caso, dever-se-ão considerar também as condições limites de funcionamento com as folgas máxima e mínima ( $F_{max.c}$  e  $F_{min.c}$ ), isto é “a amplitude do ajustamento de conceção”,  $T_{aj.c}$ . Na escolha dos ajustamentos com folga, devem ser tidas em conta as características seguintes:

- o guiamento do veio;
- a capacidade de sustentação do veio;
- as perdas por atrito nos apoios;
- as vibrações em funcionamento;
- as temperaturas de funcionamento e fora de serviço.

Quando existe a possibilidade de se escolher um **ajustamento normalizado** dentre vários, deve preferir-se aquele que apresente uma folga média,  $F_{med.}$ , igual ou ligeiramente inferior à folga média de conceção,  $F_{med.c}$ , ou seja, à média aritmética das folgas máxima e mínima de conceção

especificadas. Assim, salvo indicação em contrário, devem ser eliminadas as possibilidades de ajustamento que, embora satisfaçam as condições especificadas, apresentem uma folga média superior à folga média de concepção, ao mesmo tempo que a amplitude do ajustamento normalizado,  $T_{aj}$ , deve ser menor ou igual à amplitude de ajustamento de concepção,  $T_{ajc}$ , pelo que:

$$F_{med.} \leq F_{med.c} = (F_{max.c} + F_{min.c}) / 2 \quad (6.17)$$

$$T_{aj} = IT_{furo} + IT_{veio} \leq T_{ajc} = (F_{max.c} - F_{min.c}) \quad (6.18)$$

**Nos ajustamentos incertos**, de acordo com a norma NP 257, a sua escolha exige cuidados especiais e muita experiência, a fim de que o ajustamento concretizado tenha efetivamente o carácter pretendido.

**Nos ajustamentos com aperto**, as indicações acerca de ajustamentos recomendados, fornecidas nas figuras 6.64 e 6.65, são genéricas. Para cada caso específico de um ajustamento com aperto, deve ser determinado o aperto mínimo,  $A_{min.c}$ , necessário ao funcionamento (por exemplo, para assegurar a transmissão de um dado momento torsor) e o aperto máximo,  $A_{max.c}$ , compatível com as tensões admissíveis das matérias constituintes das peças conjugadas. O ajustamento normalizado deverá satisfazer as seguintes condições:

$$A_{min.} \geq A_{min.c} \quad \text{e} \quad A_{max.} \leq A_{max.c} \quad (6.19)$$

$$T_{aj} = IT_{furo} + IT_{veio} \leq T_{ajc} = (A_{max.c} - A_{min.c}) \quad (6.20)$$

Para o cálculo e regras de concepção deste tipo de ajustamentos, consultar a norma DIN 7190. As principais circunstâncias que podem ter influência na escolha de um ajustamento com aperto são as seguintes:

- o próprio aperto criado entre o furo e o veio;
- a espessura da parede do furo e, eventualmente, o efeito de reforço derivado do próprio processo de construção da peça que contém o furo;
- o comprimento da peça que contém o furo;
- a circunstância do veio ser maciço ou oco;
- a resistência das matérias constituintes do veio e da peça que contém o furo;
- o grau de acabamento das superfícies em contacto;
- a temperatura de funcionamento;
- o lubrificante a utilizar na montagem.

Em geral, será necessário proceder a ensaios oficiais para determinar o ajustamento conveniente. Devem merecer atenção especial os casos em que, quer pela diversidade das matérias constitutivas das peças a montar, quer pela reduzida espessura de parede das mesmas, as peças se comportem de modo diferente, em termos de deformações elásticas. O grau de acabamento das superfícies é particularmente importante para pequenos diâmetros, porque grande parte do aperto pode desaparecer durante a montagem, em consequência do alisamento das superfícies.

Além disso, normalmente, mesmo para construções semelhantes, não será possível utilizar um ajustamento igual para todos os diâmetros. Pelo contrário, dever-se-á mudar de ajustamento de modo a conseguir obter o mesmo grau de aperto, em todos os diâmetros.

O ajustamento com aperto (interferência) pode ser de dois tipos:

- ajustamento apertado a frio ou forçado em sentido axial;
- ajustamento apertado forte ou forçado em sentido radial.

No **ajustamento apertado a frio**, existe interferência e a montagem é feita à temperatura ambiente, com o emprego de um esforço exterior, no sentido axial, normalmente exercido por ação de uma prensa. No **ajustamento apertado forte**, há uma folga inicial, obtida pelo aquecimento da peça “furo” (p. ex. em banho de óleo ou por indução eletromagnética) ou pelo arrefecimento da peça “veio” (p. ex. em azoto líquido). Após a montagem, quando as temperaturas de ambas as peças igualam a temperatura ambiente, o ajustamento concretiza-se, pois as tolerâncias devem ter sido especificadas de tal forma que, à temperatura de trabalho, exista uma interferência adequada entre as peças.

Nas referências [A3, L2 e M2] pode encontrar-se uma abordagem mais desenvolvida sobre o cálculo de ajustamentos específicos, com a resolução de alguns exemplos de aplicação.

### 6.4.3.5 Método do emparelhamento

Alguns ajustamentos entre elementos de peças conjugadas, que trabalham com folga ou por vezes com aperto, necessitam de ser concebidos com amplitudes de ajustamento ( $T_{aj}$ ) muito pequenas, para que se possa assegurar uma adequada homogeneidade de funcionamento dos diferentes sistemas constituídos por esses conjuntos de peças. Uma variabilidade pequena das características funcionais dos produtos tem efeitos muito positivos na sua qualidade final, conforme constatou Taguchi, citado por Randel [R1]. Nestes casos, as tolerâncias de fabricação dos elementos das peças devem ser muito apertadas e o seu respeito obriga a recorrer, por vezes, a meios excecionais e muito caros.

Para contornar este duplo inconveniente, nos sistemas de produção automatizados, pode adotar-se o denominado **“método do emparelhamento”** [*“méthode de l'appairage ou appariement”* (fr) ou *“selective assembly or pairing”* (en)]. Com este método, procede-se à fabricação em série de lotes de peças “furo” e de peças “veio”, através de meios apropriados à obtenção de tolerâncias e acabamentos de superfície fáceis de respeitar, e, posteriormente, escolhem-se, de entre as peças fabricadas, aquelas que se podem ligar (emparelhar) nas condições de funcionamento pretendidas.

As peças “furo” e as peças “veio” são fabricadas em série com qualidades geralmente idênticas, e cada um dos respetivos intervalos de tolerância,  $IT_{furo} = IT_{veio} = A$ , é fracionado num número  $n$  de classes, conforme o esquema, apresentado na figura 6.66, relativo a um exemplo de aplicação do método numa ligação de peças com folga.



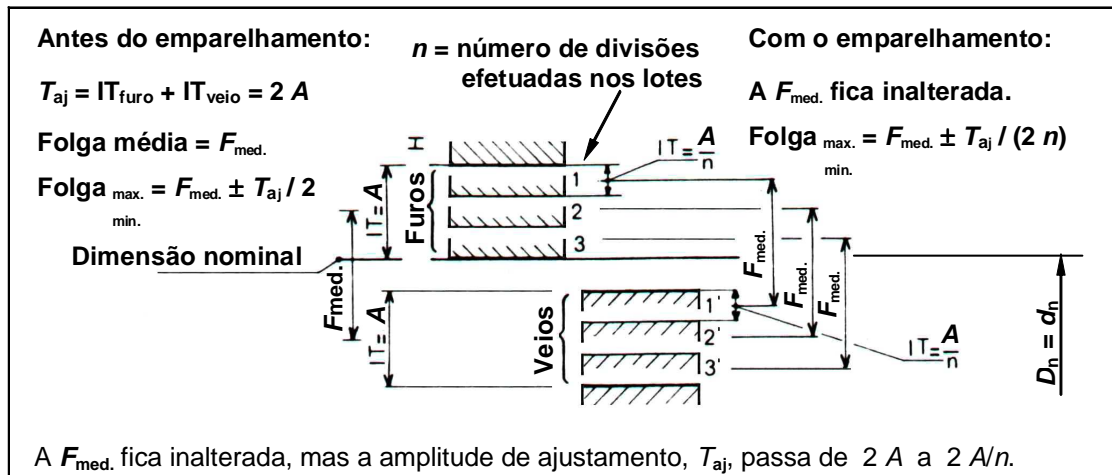


Figura 6.66 – Esquema do método de emparelhamento. Adaptada de [C1]

Para este fim, após as respectivas operações de trabalho mecânico, por intermédio de sistemas de verificação com dispositivos de medição e de classificação por triagem, as peças são medidas através de meios expeditos e com boa exatidão e, ao mesmo tempo, são classificadas em sublotes e referenciadas. Posteriormente, ao montar (emparelhar) as peças “furo” e as peças “veio”, provenientes dos sublotes com os mesmos índices (1 – 1'; 2 – 2', 3 – 3', etc.), obtêm-se montagens com folgas de valores médios idênticos ( $F_{\text{med.}}$ ), mas cuja respectiva amplitude de ajustamento  $T_{aj}$  passou de  $2 A$  a  $2 A / n$  (ver figura 6.66), sendo tanto mais restrita quanto maior for o número de classes resultantes do fracionamento dos lotes iniciais.

Este método torna-se mais complicado quando as capacidades dos processos produtivos das peças a emparelhar são diferentes e as quantidades de peças existentes nos sublotes a conjugar não são iguais, dando origem a peças excedentárias. Umaras [U1] assinala a existência de trabalhos sobre algoritmos de otimização com vista a tentar minimizar a ocorrência de peças sobrantes neste tipo de processos. Como exemplos de aplicação deste tipo de procedimento, podem referir-se as indústrias de produção de rolamentos e de dispositivos para as indústrias automóvel e aeronáutica.

#### 6.4.3.6 A indicação de ajustamentos ISO na documentação técnica de produtos

Na norma ISO 286-1:2010, a especificação, por omissão, para tamanhos passou a ser o “tamanho entre dois pontos”, em consonância com a aplicação, por omissão, do princípio de independência, a todo o desenho (ver normas ISO 8015 e ISO 14405-1). Logo, os tamanhos com os códigos ISO das classes de tolerância, de elementos destinados a preencher uma função de ajustamento entre peças conjugadas, devem ser indicados, no desenho, em conjunto com o símbolo  $\textcircled{E}$  relativo ao “requisito de envolvente” (ver secção 6.3.2.1), de acordo com os exemplos apresentados na figura 6.67.

Se for necessário indicar explicitamente os valores numéricos dos desvios limites (prática aconselhada em desenhos de fabricação), esses valores devem ser inscritos, entre parêntesis, a seguir aos identificadores das classes de tolerância [ver figura 6.67 c)].

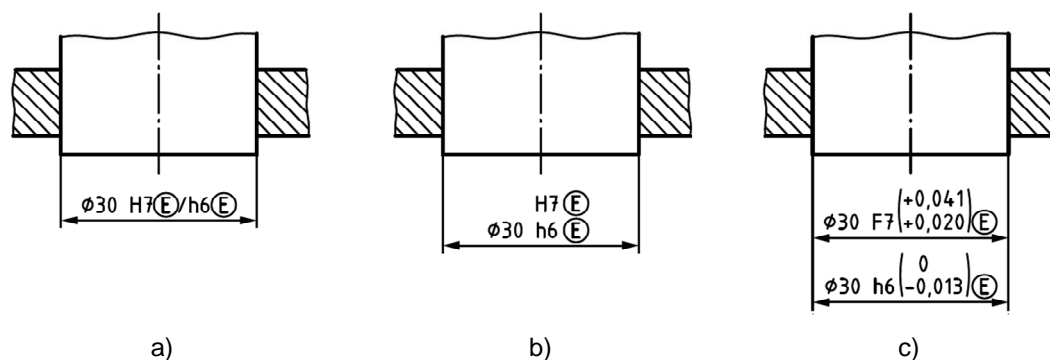


Figura 6.67 – Exemplos de desenhos de conjunto com os elementos “furo” e “veio” de um ajustamento toleranciados por meio de identificadores das classes de tolerância ISO (ISO 14405-1)

Alternativamente, de acordo com a ISO 286-1, na especificação de um ajustamento, quando se utiliza a indicação de tolerâncias  $\pm$ , resultantes de classes de tolerância, estas poderão também ser inscritas entre parêntesis, a título de informação auxiliar:

$$\begin{array}{ccc} +0,021 & & -0,020 \\ \phi 30 & 0 & (H7) \text{ (E)} / \phi 30 & -0,033 & (f6) \text{ (E)} \end{array}$$

De acordo com a norma ISO 286-1, não se torna necessário aplicar a especificação do “requisito de envolvente” (E) em ajustamentos “apertados fortes” do tipo  $\phi 40 H6/u5$  e  $\phi 40 U6/h5$  ou ainda para esforços mais elevados, certamente devido à apreciável deformação plástica registada nas superfícies dos elementos conjugados após a sua montagem.

Em princípio, os códigos das classes de tolerância deverão ser utilizados em tamanhos de elementos que preenchem uma condição de ajustamento entre duas peças conjugadas. No entanto, as tolerâncias fornecidas nesse documento normativo podem ser utilizadas para outros fins (por exemplo, em produtos semifabricados, tais como chapas, barras, material em fita, etc.), em que não é requerida qualquer condição de ajustamento. Nestes casos, o tamanho linear e a sua tolerância podem também ser designados pelo tamanho nominal seguido dos desvios limites  $\pm$ .

Adicionalmente, existem muitos elementos, especialmente com classes de tolerância H12 a H18 e h12 a h18, que também não são utilizados em ajustamentos e onde a especificação do “requisito de envolvente” não é necessária, tais como:

- furos de passagem para parafusos (ISO 273):  $\phi D H12$  (finos);  $\phi D H13$  (médios) e  $\phi D H14$  (largos);
- tolerâncias dos elementos de fixação – Parte 1: Parafusos, pernos e porcas (ISO 4759-1): cabeças hexagonais (distâncias entre faces,  $s h13$  ou  $s h14$ ; alturas das cabeças,  $m js14$  a  $m js17$ ); fendas para acionamento ( $n C13$ ,  $n C14$ ); outras cabeças de parafusos (diâmetros,  $d_k h13$  e  $d_k h14$ ; alturas das cabeças,  $k h13$  e  $k h14$ ); comprimentos do corpo ( $l js15$  e  $l js17$ ); etc.
- etc.

#### 6.4.3.7 Verificação de especificações de tamanhos lineares por meio de calibres de limites para peças lisas

A verificação de limites de tolerâncias por meio de calibres permite ao utilizador o controlo de um limite de especificação, nomeadamente uma dimensão, através de um processo físico, sem ter de recorrer a ferramentas matemáticas. No caso de “**calibres de limites para peças lisas**”, tratados na norma ISO 1938-1, a verificação de limites por meio de calibres consiste em “**verificar a característica de tamanho**” de um elemento de tamanho.

A verificação de limites por meio de calibres não é uma técnica utilizada num processo de medição com vista à obtenção de um valor numérico de uma característica – “**um controlo por variáveis**”. É uma técnica utilizada num processo de controlo para fornecer apenas um de dois resultados possíveis (Sim/Não, PASSA/NÃO PASSA, Aceite/Não aceite, etc.) – “**um controlo por atributos**” [P1].

Existem dois tipos de verificações de limites por meio de calibres: a verificação do tamanho de máximo de matéria e a verificação do tamanho de mínimo de matéria. A verificação por intermédio de calibres de limites é um método autorizado para a aceitação, e admite-se que uma especificação dimensional de uma peça é aceitável se o resultado da verificação por calibre estiver conforme com os requisitos desta parte da ISO 1938.

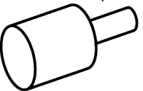
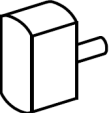
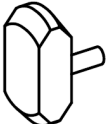
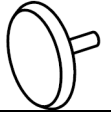
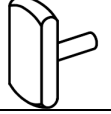


Para evitar qualquer litígio que exija a verificação dos calibres do fabricante, a norma ISO 1938-1 recomenda a adoção de procedimentos adequados na utilização de calibres do fabricante e do comprador. Este método tem vantagens e desvantagens quando comparado com outros tipos de métodos de verificação, conforme se resume no quadro 6.14.

Quadro 6.14 – Vantagens e desvantagens dos calibres de limites (ISO 1938-1)


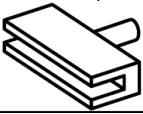

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Método económico para definir a aceitação de uma característica.</li> <li>– Utilização simples de um processo físico.</li> <li>– Fornece uma resposta rápida.</li> <li>– Próximo de um princípio de comparação, que permite reduzir a incerteza de fatores ambientais.</li> <li>– Apresenta uma incerteza muito baixa associada ao valor metrológico do tamanho do calibre.</li> <li>– Próximo do requisito de envolvente, para a verificação do limite PASSA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Quando o resultado for uma não-aceitação, é impossível saber, diretamente, como se poderá ajustar o processo em conformidade com o procedimento de fabricação.</li> <li>– É um dispositivo dedicado a uma aplicação específica, que não fornece um valor numérico.</li> <li>– A incerteza do processo de verificação é difícil de avaliar em termos económicos, porque a incerteza de ajuste do processo depende de fatores múltiplos, tais como a forma, a força e o operador.</li> <li>– Não satisfaz o requisito de verificação do limite NÃO PASSA, porque depende da forma da peça (em forma de tonel ou em de forma de diábolo): esta aproximação depende do desvio de forma da peça que é possível avaliar.</li> </ul>

A utilização específica dos vários tipos de calibres e a incerteza associada pode ser sintetizada nos quadros 6.15 e 6.16. A verificação de peças não rígidas (p. ex. de paredes finas) por meio de calibres requer a tomada de um conjunto de precauções (ver ISO 1938-1).

Quadro 6.15 – Tipos de calibres de limites para “furos”, sua utilização específica e incerteza associada (ISO 1938-1)

Tipo	Ilustração	Tipo de elemento de tamanho na peça	Característica	Componente de incerteza adicional comparada à característica metrológica
A	Calibre tampão cilíndrico de forma completa 	Cilindro  Dois planos paralelos opostos	Verificação da característica de tamanho com o modificador $(\overline{GX})$ no limite inferior para um furo cilíndrico  Verificação da característica de tamanho com o modificador $(\overline{GX})$ no limite inferior para duas linhas retas opostas	Comprimento do calibre em relação ao comprimento da peça
B	Calibre achatado de extremidades cilíndricas 	Duas porções angulares opostas de um cilindro  Dois planos paralelos opostos	Aproximação do tipo A para furos cegos ou para elementos cilíndricos interrompidos, ou para furos em que a especificação só se aplica a uma porção angular	Comprimento e largura angular do calibre comparados com o(s) elemento(s) tolerado(s) na peça
C	Calibre achatado de extremidades cilíndricas com superfícies de verificação reduzidas 	Duas porções angulares reduzidas opostas de um cilindro  Dois planos paralelos opostos	Aproximação de tipo B com comprimento restrito  Tal como para o tipo A, mas com comprimento restrito	Comprimento e largura angular do calibre comparados com o(s) elemento(s) tolerado(s) na peça
D	Calibre tampão esférico de forma completa 	Círculo  Dois planos paralelos opostos	Característica de tamanho com o modificador $(\overline{GX})$ ACS  Dois pontos	Nenhuma
E	Calibre achatado de extremidades esféricas 	Duas porções angulares reduzidas opostas de um círculo  Dois planos paralelos opostos	Tal como para o tipo D, para porções angulares consideradas como um elemento  Tal como para o tipo D	Nenhuma
F	Calibre achatado 	Dois planos paralelos opostos	Modificador $(\overline{GX})$ no tamanho entre dois planos opostos	Comprimento e largura do calibre comparados com a peça
G	Calibre vareta de topos esféricos 		Dois pontos (LP)	Nenhuma

Quadro 6.16 – Tipos de calibres de limites para “veios”, sua utilização específica e incerteza associada (ISO 1938-1)

Tipo	Ilustração	Tipo de elemento de tamanho na peça	Característica	Componente de incerteza adicional comparada à característica metrológica
H	Calibre de anel cilíndrico de forma completa 	Cilindro	Verificação da característica tamanho com o modificador $(\overline{GN})$ no limite superior para um veio cilíndrico	Comprimento do calibre em relação ao comprimento da peça
J	Calibre de entalhe de forma completa 	Duas linhas retas paralelas opostas num cilindro  Dois planos paralelos opostos	Verificação da característica de tamanho com o modificador $(\overline{GN})$ ALS no limite superior para duas linhas retas opostas  Verificação da característica tamanho com o modificador $(\overline{GN})$ no limite superior para dois planos paralelos opostos	Largura do calibre comparado com a peça  Comprimento e largura do calibre comparados com a peça
K	Calibre maxila 	Dois segmentos retos paralelos opostos num cilindro  Dois planos paralelos opostos	Modificador $(\overline{GN})$ ACS no tamanho entre dois segmentos retos paralelos opostos  Modificador $(\overline{GN})$ no tamanho entre duas porções de planos paralelos opostas	Nenhuma

Os valores dos intervalos de tolerância,  $H$ , na característica de tamanho,  $S$ , para um calibre de limites no estado de novo e os valores das tolerâncias,  $F$ , das especificações de forma num calibre de limites, para o cálculo dos limites máximos admissíveis de calibres de limites para graus de tolerância em conformidade com a ISO 286-1, estão indicados no quadro 6.17.

Quadro 6.17 – Valores de  $H$  e  $F$  para o cálculo dos limites máximos admissíveis (MPL) de calibres de limites para graus de tolerância, em conformidade com a ISO 286-1 (ISO 1938-1)

Tipo de calibre	Graus de tolerância normalizados da peça									
	IT6		IT7		IT8 a IT10		IT11 a IT12		IT13 a IT18	
	Tam.	Forma e orientação	Tam.	Forma e orientação	Tam.	Forma e orientação	Tam.	Forma e orientação	Tam.	Forma e orientação
	$H$	$2 \times F$	$H$	$2 \times F$	$H$	$2 \times F$	$H$	$2 \times F$	$H$	$2 \times F$
Calibre tampão cilíndrico de forma perfeita	IT2	IT1	IT3	IT2	IT3	IT2	IT5	IT4	IT7	IT5
Calibre achatado de extremidades cilíndricas										
Calibre achatado de extremidades cilíndricas com superfícies de verificação reduzidas										
Calibre tampão esférico de forma completa										
Calibre achatado de extremidades esféricas	IT2	IT1	IT2	IT1	IT2	IT1	IT4	IT3	IT6	IT5
Calibre achatado	IT2	IT1	IT3	IT2	IT3	IT2	IT5	IT4	IT7	IT5
Calibre vareta de topos esféricos	IT2	IT1	IT2	IT1	IT2	IT1	IT4	IT3	IT6	IT5
Calibre de anel cilíndrico de forma completa	IT3	IT2	IT3	IT2	IT4	IT3	IT5	IT4	IT7	IT5
Calibre de entalhe de forma completa	IT3	IT2	IT3	IT2	IT4	IT3	IT5	IT4	IT7	IT5
Calibre maxila	IT3	IT2	IT3	IT2	IT4	IT3	IT5	IT4	IT7	IT5

$H$  – valor do intervalo de tolerância na característica de tamanho,  $S$ , para um calibre de limites no estado de novo.

$F$  – valor da tolerância da especificação de forma num calibre de limites.

Se o intervalo de tolerância for indicado através de tolerâncias  $\pm$  e não de acordo com o código ISO, deve utilizar-se o primeiro grau IT com um intervalo de tolerância menor ou igual a esse intervalo de tolerância, no mesmo intervalo de tamanhos nominais. Os calibres para os graus IT17 e IT18 são de utilidade limitada na prática corrente de verificação.

## 6.5 Tamanhos angulares

### 6.5.1 Generalidades

De acordo com o princípio de independência, por omissão, uma dimensão angular toleranciada em unidades angulares, inscrita num desenho, limita apenas os tamanhos angulares locais (“tamanhos angulares entre duas linhas”) de um elemento de tamanho angular (ver secção 6.2.1.2), mas não os seus desvios de forma (ver figura 6.68).

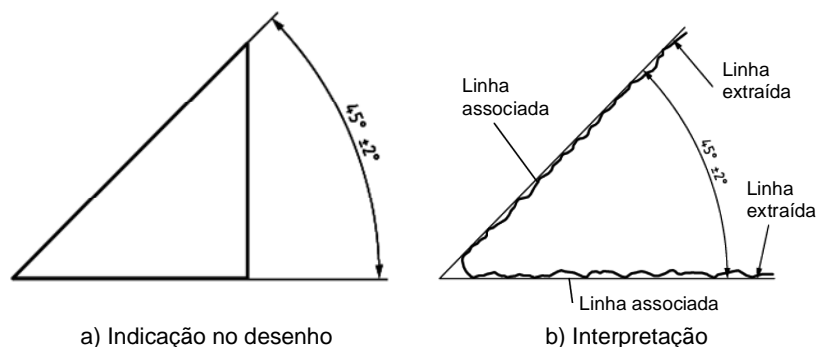


Figura 6.68 – Tolerância angular numa secção reta qualquer de uma cunha

Na nova linguagem ISO, por omissão, uma dimensão angular toleranciada limita inequivocamente apenas os tamanhos definidos, em conformidade com a norma ISO 14405-3, por meio de procedimentos numéricos a implementar em máquinas de medição de coordenadas.

Um “**tamanho angular entre duas linhas**” é um tamanho angular local que é o ângulo entre duas linhas retas associadas, estabelecidas a partir de duas linhas extraídas, obtidas pela interseção da superfície extraída com um plano definido com base no elemento de tamanho angular associado (ver figura 6.69).

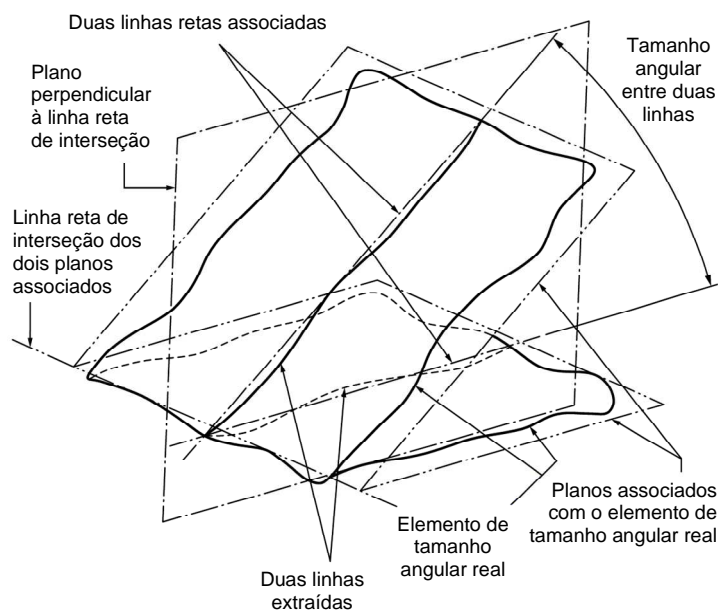


Figura 6.69 – Tamanho angular entre duas linhas (ISO/FDIS 14405-3)

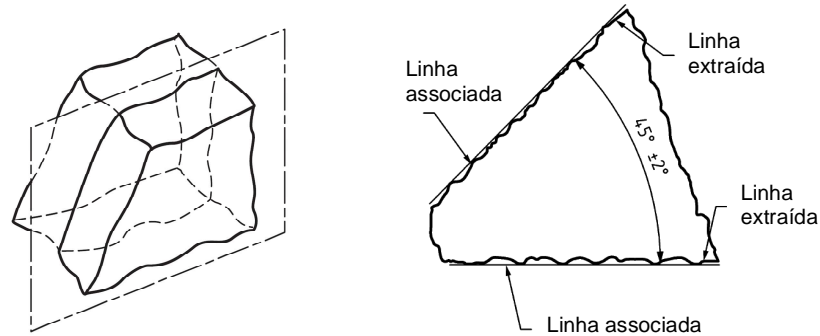
O critério de associação adotado, por omissão, para o “tamanho angular entre duas linhas” é o “**critério minimax**” que minimiza a distância máxima entre os elementos associados e os elementos extraídos, por ser o operador que mais se aproxima do especificado na ISO 8015:1985 e na ISO 14405-2.

Num “tamanho angular entre duas linhas”, realizam-se **duas operações de associação consecutivas**:

- 1) Associam-se os elementos de tamanho angular reais com elementos associados da mesma natureza.
- 2) Associam-se as linhas extraídas (resultantes da interseção entre elementos de tamanho angular reais e o plano de interseção) com duas linhas retas [ver figura 6.70 b), com exemplo do critério minimax].

**Na 1ª operação de associação**, o critério de associação é obrigatoriamente uma associação dos mínimos quadrados, sem qualquer restrição em relação à matéria, para as duas superfícies extraídas de um elemento de tamanho prismático (independentemente uma da outra) e para a superfície extraída de um elemento de tamanho de revolução (não havendo lugar à indicação de qualquer símbolo modificador). Esta associação destina-se a estabelecer uma **linha de interseção estável** para o elemento de tamanho prismático ou um **eixo estável** para o elemento de tamanho de revolução.

Na 2ª operação de associação, o critério de associação tanto pode ser um critério de associação minimax (opção por omissão, correspondente ao símbolo modificador (LC)) ou um critério de associação dos mínimos quadrados, sem qualquer restrição em relação à matéria, (havendo lugar à indicação obrigatória do símbolo modificador (LG)). **As duas linhas são associadas independentemente uma da outra**, para evitar uma possível ocorrência de alguma instabilidade numérica.



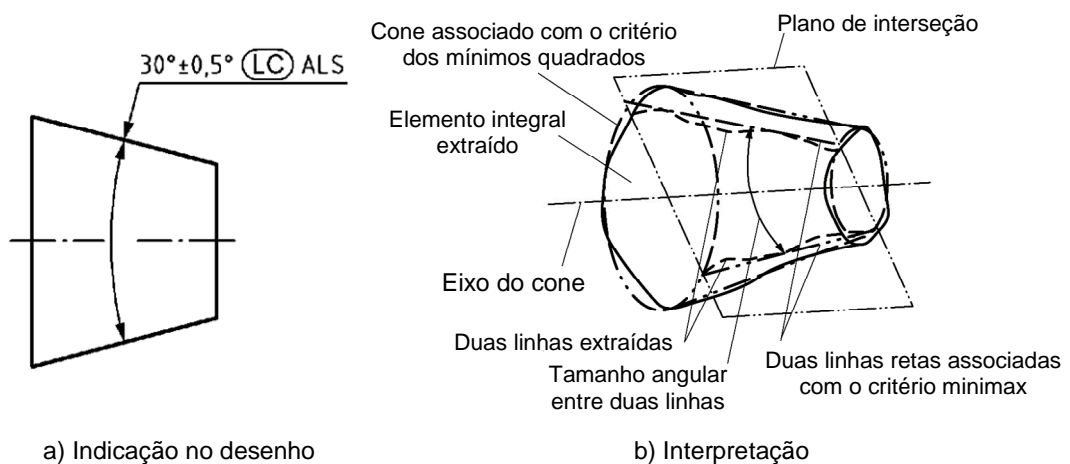
Exemplo da 2ª operação de associação com a utilização do critério minimax

a) Plano de interseção de uma cunha      b) Tamanho angular entre duas linhas

Figura 6.70 – Exemplo de tamanho angular entre duas linhas para um elemento de tamanho prismático.

Um “tamanho angular entre duas linhas” pode ainda ser subdividido em:

- a) O “**tamanho angular entre duas linhas para um elemento de tamanho de revolução**” que é o ângulo entre as duas linhas retas associadas com duas linhas extraídas, resultantes da interseção de um elemento de revolução extraído com um plano que contém o eixo do seu elemento de revolução associado [ver figuras 6.19 f) e 6.71].



a) Indicação no desenho

b) Interpretação

Figura 6.71 – Exemplo de tamanho angular entre duas linhas para um elemento de tamanho de revolução. Adaptada da ISO 3040

- b) O “**tamanho angular entre duas linhas para um elemento de tamanho prismático**” que é o ângulo entre duas linhas retas associadas com duas linhas extraídas, resultantes da interseção de duas superfícies extraídas, nominalmente planas, com um plano que é perpendicular à linha reta de interseção das suas duas superfícies associadas (ver figuras 6.69 e 6.70).

### 6.5.2 Tipos de tamanhos angulares

A norma ISO 14405-3, atualmente em fase projeto, fornece aos projetistas um conjunto substancial de novas ferramentas de especificação, para a indicação de diversos tipos de tamanhos angulares em elementos das peças, de modo que diferentes requisitos funcionais possam vir a poder ser definidos com grande detalhe.

Antes do desenvolvimento desta nova norma, estava implícito que os tamanhos angulares toleranciados deveriam ser verificáveis através de instrumentos de metrologia convencional (sutas universais, réguas e planos de senos, dispositivos de medição de cones, etc.), que continuam ainda a ser predominantes no âmbito da verificação manual. No entanto, os novos conceitos estabelecidos nesta norma só podem ser verificados, adequadamente, através de sistemas de medição de coordenadas computadorizados, munidos de algoritmos para o ajuste numérico dos elementos associados aos elementos extraídos.

A nova ISO 14405-3 vai estabelecer o operador (conjunto ordenado de operações) de especificação por omissão (“*by default*”) para o tamanho angular e definir um conjunto de operadores de especificação especiais para o tamanho dos elementos de tamanho angular do tipo de revolução: “cone”, “tronco de cone”, “duas linhas retas opostas” (secção longitudinal de um cone/tronco de cone resultante da sua interseção com um plano que contém o seu eixo de revolução); e do tipo prismático: “cunha (truncada ou não)” e “duas linhas retas opostas” (secção reta de uma cunha/cunha truncada resultante da sua interseção com um plano perpendicular à linha reta de interseção dos dois planos da cunha), ver figura 6.19. Há de estabelecer também os símbolos modificadores de especificação (ver quadro 6.18) e as indicações a inscrever nos desenhos, para definir estes tamanhos angulares (ver secção 6.5.5).

Quadro 6.18 – Tipos de tamanhos angulares e símbolos modificadores de especificação (ISO/FDIS 14405-3)

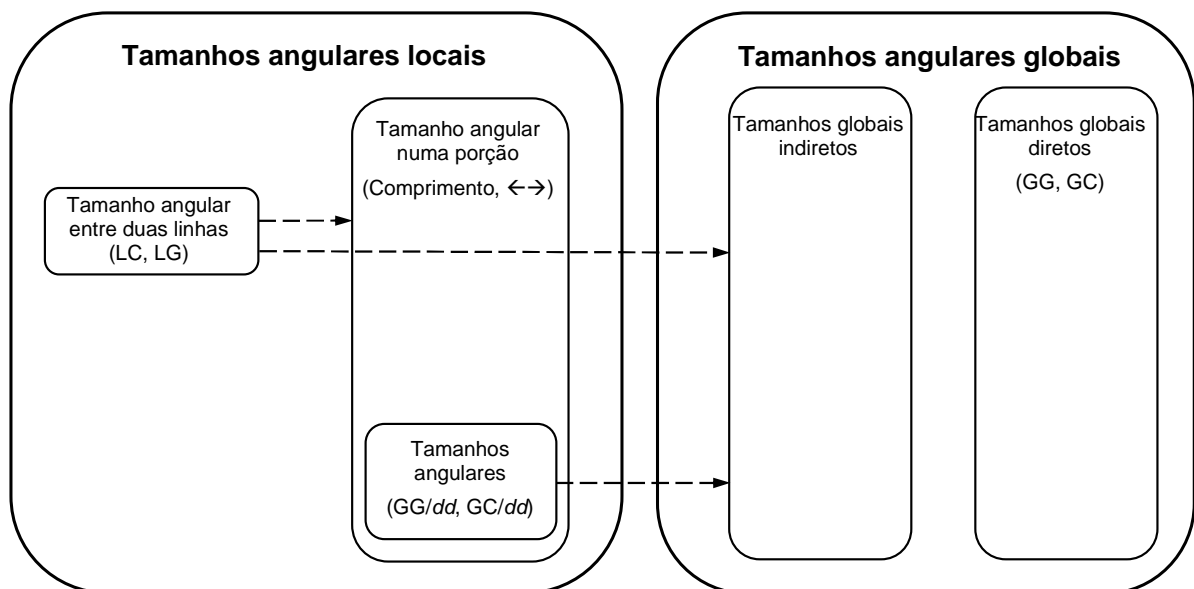
Descrição	Modificador
Tamanho angular entre duas linhas com o critério de associação minimax	(LC)
Tamanho angular entre duas linhas com o critério de associação dos mínimos quadrados	(LG)
Critério de associação dos mínimos quadrados	(GG)
Critério de associação minimax	(GC)
Tamanho angular máximo (por ordenação)	(SX)
Tamanho angular mínimo (por ordenação)	(SN)
Tamanho angular médio (por ordenação)	(SA)
Tamanho angular mediano (por ordenação)	(SM)
Tamanho angular central (por ordenação)	(SD)
Amplitude de tamanhos angulares (por ordenação)	(SR)
Desvio padrão de tamanhos angulares (por ordenação)	(SQ)



Por omissão, a indicação de tolerância para um tamanho aplica-se a um único elemento de tamanho completo. No entanto, é possível indicar que a tolerância diz respeito apenas a uma parte restrita do elemento (porção) ou que se aplica a mais do que um elemento de tamanho (através do símbolo modificador **nx**).

Estes tipos de tamanhos angulares podem ser reunidos em três grandes grupos (ver figura 6.72):

- i) Os “**tamanhos angulares locais**” (“*local angular sizes*”) que são características de tamanho angular que têm um valor único, para uma posição específica, e um resultado de avaliação não único, ao longo e/ou a toda a volta dos respetivos elementos de tamanho angular. Logo, para um dado elemento de tamanho, existe uma infinidade de tamanhos locais (ver exemplos nas figuras 6.69, 6.70, 6.71 e 6.74).



**Legenda:**

- — — ➔ Tamanho angular definido através de um **tamanho angular por ordenação**.  
**dd** Dimensão que define a porção.

Figura 6.72 – Esquema global das relações entre vários tamanhos angulares (ISO/FDIS 14405-3)

- ii) Os “**tamanhos angulares globais**” (“*global angular sizes*”) que são características de tamanho que apresentam um valor único, para a totalidade do elemento de tamanho angular toleranciado. Os tamanhos globais podem ser diretos (ver figura 6.73) ou indiretos.

Um **tamanho angular global direto** é igual ao tamanho angular de um elemento associado, que é do mesmo tipo geométrico do elemento de tamanho angular, ou do tamanho angular global entre dois elementos associados (ver exemplos nas figuras 6.73 e 6.75). Um **tamanho angular global indireto** é um tamanho por ordenação.

- iii) Os “**tamanhos angulares por ordenação**” (“*rank order angular sizes*”) que são características de tamanho angular definidas matematicamente a partir de um conjunto homogêneo de valores de tamanhos locais, obtidos ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho angular.

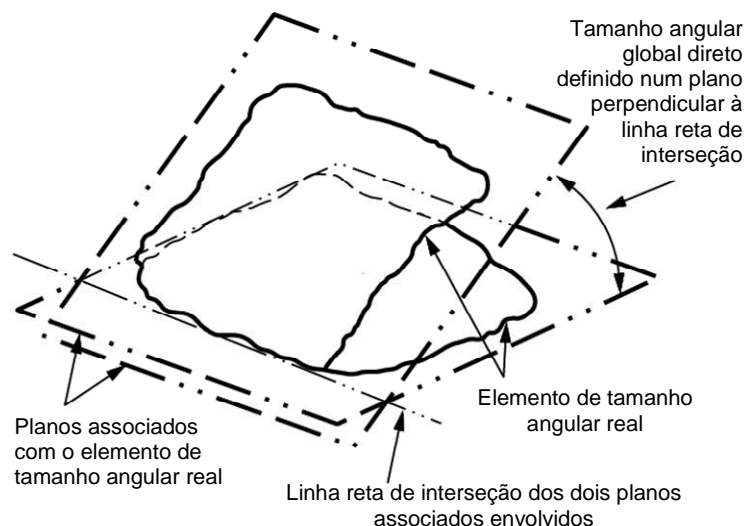


Figura 6.73 – Tamanho angular global direto (ISO/FDIS 14405-3)

Um “tamanho angular por ordenação” pode definir um valor único de avaliação ao longo e/ou a toda a volta do elemento de tamanho angular, a partir de tamanhos angulares locais de uma porção ou da totalidade do elemento de tamanho angular.

Um “tamanho angular por ordenação” pode definir um tamanho angular local a partir de outros tamanhos locais, por exemplo, um tamanho angular por ordenação numa porção, obtido a partir de tamanhos angulares entre duas linhas considerados nessa porção.

Ver secções 6.3.2 e 6.3.5 a 6.3.7, para uma abordagem detalhada dos vários subtipos dos tamanhos por ordenação. Um tamanho angular global indireto pode ser, por exemplo, a média de todos os valores de tamanhos angulares entre duas linhas, registados numa superfície cónica extraída.

Deste modo, o projetista passou a ter mais possibilidades para indicar, no desenho, o tipo de tamanho angular que melhor se relaciona com a função pretendida para um dado elemento de uma peça (figura 6.68). Um tamanho angular pode ser avaliado, no elemento extraído, através de uma ou mais características de tamanho angular. Os tamanhos angulares (características de tamanho angular), indicados no quadro 6.18, podem ser definidos de modo sucinto:

- a) O “**tamanho angular entre duas linhas**” (LC, LG) é o ângulo entre duas linhas retas associadas, estabelecidas a partir de duas linhas extraídas obtidas pela interseção da superfície extraída com um plano definido com base no elemento de tamanho angular associado (ver figura 6.69).
- b) O “**tamanho angular numa porção**” é um tamanho angular global da superfície associada, estabelecida a partir de uma porção específica da superfície extraída do elemento de tamanho angular real (ver figura 6.74).

Este tamanho é um tamanho angular local quando se tem em consideração o elemento de tamanho angular completo.

- c) O “**tamanho angular global dos mínimos quadrados**” (**GG**) é a característica de tamanho angular global direto definida através da utilização do critério de associação dos mínimos quadrados [ver figura 6.75 a)].
- d) O “**tamanho angular global minimax**” (ou de Chebyshev) (**GC**) é a característica de tamanho angular global direto definida através da utilização do critério de associação minimax [ver figura 6.75 b)].

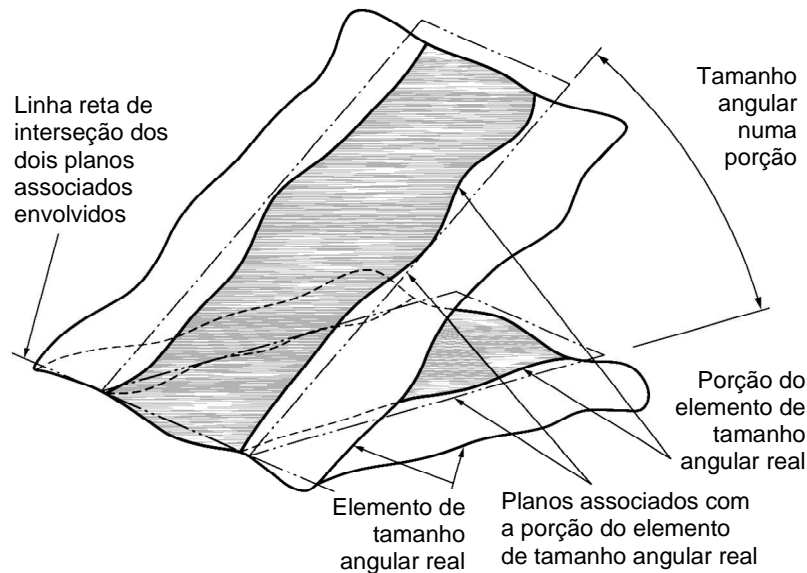
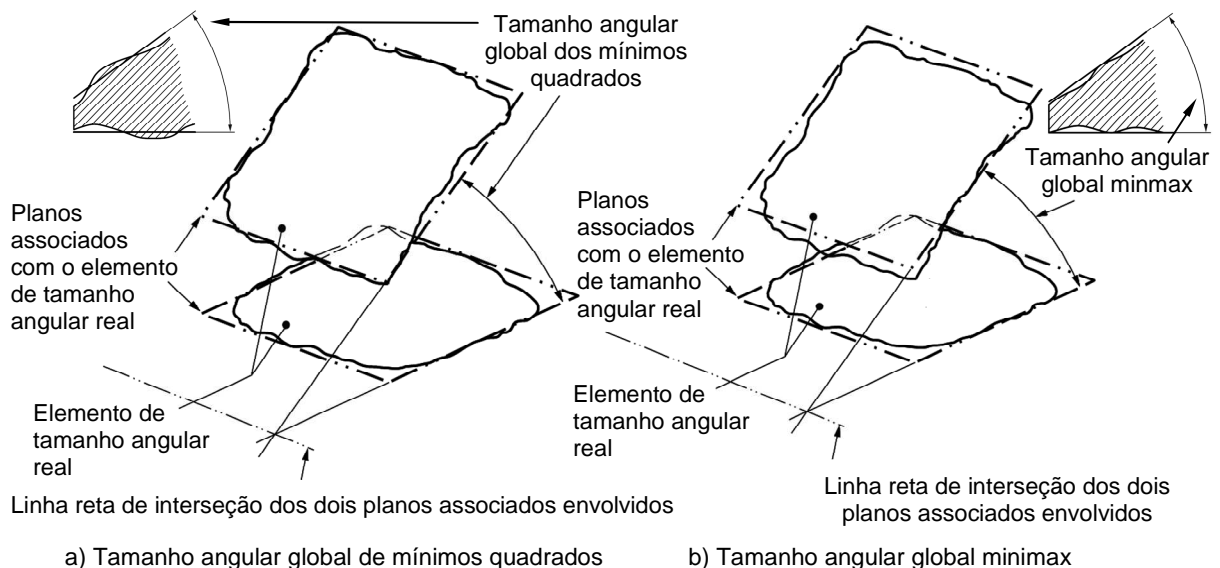


Figura 6.74 – Tamanho angular numa porção (ISO/FDIS 14405-3)



a) Tamanho angular global de mínimos quadrados

b) Tamanho angular global minimax

Figura 6.75 – Dois tamanhos angulares globais definidos no mesmo elemento de tamanho angular real (ISO/FDIS 14405-3)

### 6.5.3 Modificadores de especificação gerais para tamanhos

Com base nos símbolos modificadores correspondentes aos diferentes tipos de tamanhos angulares, em fase de definição (ver quadro 6.18), complementados com os modificadores de especificação

gerais para tamanhos angulares, indicados no quadro 6.19, é possível definir, numa especificação dimensional, um tipo específico de característica de tamanho (local, global, etc.), que pode ser igual ou diferente para os limites superior e inferior da especificação, considerado mais adequado para o desempenho de uma dada função, de modo a permitir o controlo da definição do elemento geométrico e do método de avaliação a utilizar, ver exemplo na figura 6.79 b).

Quadro 6.19 – Modificadores de especificação gerais para tamanhos angulares (ISO/FDIS 14405-3)

Descrição	Símbolo	Exemplo de indicação	
		Cunha (ou duas linhas retas opostas baseadas numa cunha)	Cone (ou duas linhas retas opostas baseadas num cone)
Porção restrita qualquer do elemento de tamanho angular	/ comprimento linear	$35^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ (GC) } / 15$	$35^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ (GC) } / 15$
Porção restrita qualquer do elemento de tamanho angular	/ distância angular	Não aplicável	$35^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ (GG) } / 15^{\circ}$
Secção reta fixa específica ("specific cross section")	SCS	$35^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ SCS}$	Não aplicável
Mais do que um elemento	Número x	$2 \times 45^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ (GC)}$	$2 \times 45^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ (GC)}$
Elemento de tamanho toleranciado comum	CT	$2 \times 45^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ (GG) CT}$	$2 \times 45^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ (GG) CT}$
Condição de estado livre ("free-state condition")	(F)	$35^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ (LG) (SN) (F)}$	$35^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ (LG) (SN) (F)}$
Entre ("between")	$\longleftrightarrow$	$35^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ A } \longleftrightarrow \text{ B}$	$35^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ A } \longleftrightarrow \text{ B}$

#### 6.5.4 Os operadores de especificação, por omissão, para tamanhos angulares

Quando a indicação GPS de base é utilizada para o tamanho angular, aplica-se o operador de especificação, por omissão, para tamanho angular. Este operador pode ser, por exemplo:

- o operador de especificação GPS ISO geral, por omissão;
- o operador de especificação GPS ISO geral, por omissão, específico do desenho;
- o operador de especificação GPS geral, por omissão, alterado (ver secção 5.5 e a ISO 8015).

A especificação GPS de base para um tamanho angular não inclui qualquer modificador de especificação, podendo assumir um dos seguintes quatro tipos indicados no quadro 6.20.

- a) O operador de especificação ISO geral, por omissão, para os tamanhos angulares

O operador de especificação ISO geral, por omissão, para os tamanhos angulares (sem modificador de especificação) é o **"tamanho angular entre duas linhas"**, que se aplica quando não há qualquer indicação no desenho relativa a outro operador de especificação, por omissão, para tamanhos angulares.

Quadro 6.20 – Diferentes especificações GPS de base para tamanhos angulares (ISO/FDIS 14405-3)

Especificação GPS de base para tamanho angular	Exemplos
Tamanho angular nominal $\pm$ desvios limites <sup>a)</sup>	$35^\circ \pm 1^\circ$ $+0^\circ 1'$ $35^\circ - 0^\circ 2'$
Valores dos limites superior e inferior de tamanho angular <sup>a)</sup>	$36^\circ$ $34^\circ$
Valor limite superior ou inferior de tamanho angular (limite num só sentido) <sup>a)</sup>	$45^\circ \text{max.}$ $32^\circ \text{min.}$
Toleranciamento geral definido através de um tamanho angular nominal, não indicado entre parêntesis nem como uma dimensão teoricamente exata <sup>b)</sup>	$45^\circ$ , com a indicação p. ex. da norma ISO 2768-f, na legenda
<sup>a)</sup> O tamanho angular nominal e os desvios limites devem ser indicados com a indicação da unidade (graus e décimas de grau ou graus, minutos e segundos). <sup>b)</sup> Ver a norma ISO 2768-1 para informação sobre toleranciamento geral.	

Se o “tamanho angular entre duas linhas” (por omissão) se aplicar a ambos os limites especificados, o modificador  $\text{Ⓛ⓬}$  pode ser omissa [ver exemplo na figura 6.76 a)]. Os conceitos expressos na norma ISO 14405-3 assentam numa metrologia digital computadorizada. A verificação de um tamanho angular entre duas linhas, recorrendo a uma suta universal, será realizada com uma incerteza significativa do método de medição.

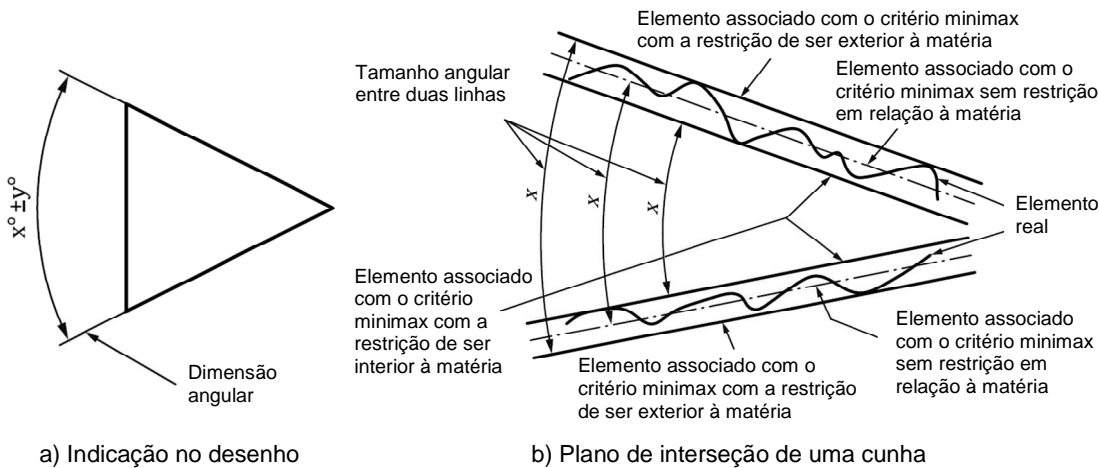


Figura 6.76 – Tolerância angular numa secção reta qualquer de uma cunha (ISO/FDIS 14405-3).

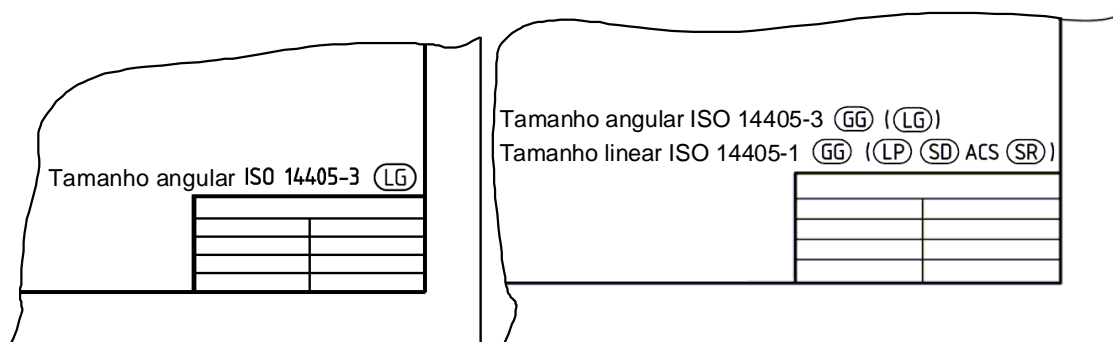
No caso do critério minimax, não há qualquer impacte no resultado da avaliação de tamanho angular, quando a restrição em relação à matéria é ou não utilizada.

A tolerância aplica-se a todas as secções retas em que existe um ângulo ao longo das duas superfícies integrais reais e todos esses ângulos devem estar contidos dentro do intervalo de tolerância.

- b) O operador de especificação geral, por omissão, específico do desenho, para os tamanhos angulares

Quando se aplicar um operador de especificação, por omissão, específico do desenho, para os tamanhos angulares, tal deve ser indicado, no desenho, no interior ou junto da legenda, com a indicação da referência a esta Parte da norma ISO 14405, seguida pelo(s) modificador(es) de especificação relativo(s) à definição de tamanho angular, por omissão, escolhida, p. ex. “Tamanho angular ISO 14405-3 (LG)”, ver figura 6.77 a).

Se for necessário indicar operadores de especificação diferentes, por omissão, para tamanhos lineares e/ou angulares, deve ser feita uma referência simultânea às normas respetivas, ver figura 6.77 b).



a) Tamanho angular dos mínimos quadrados

b) Tamanhos angular e linear dos mínimos quadrados, com indicação adicional de operadores de especificação especiais

Figura 6.77 – Exemplos de alteração do operador de especificação, por omissão, para os tamanhos angulares/lineares, aplicado a todo o desenho (ISO/FDIS 14405-3)

Para facilitar a leitura do desenho, é possível indicar, entre parêntesis, todos os outros tipos de modificadores utilizados no desenho, após a indicação da especificação, por omissão, específica do desenho.

### 6.5.5 Exemplos de indicações nos desenhos de operadores de especificação especiais para tamanhos angulares

Por omissão, uma indicação de tolerância para um tamanho angular aplica-se a um único elemento de tamanho angular completo (ver figura 6.78). No entanto, é também possível indicar que a tolerância se aplica a uma parte restrita qualquer ou a uma parte restrita fixa do elemento de tamanho angular (ver quadro 6.19).

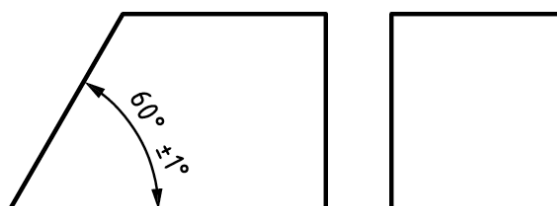
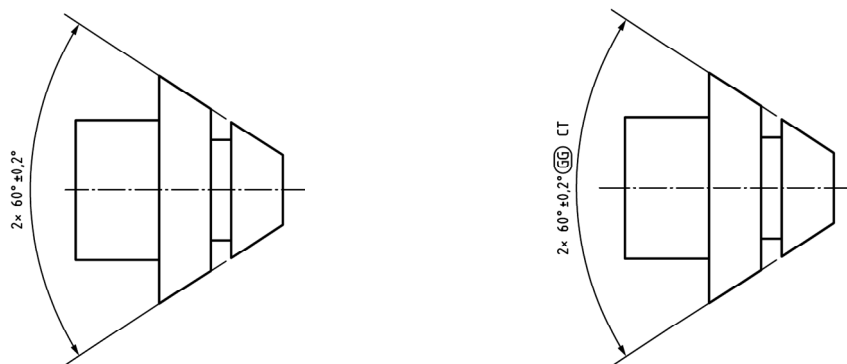


Figura 6.78 – Exemplo de requisito para o elemento de tamanho angular completo (ISO/FDIS 14405-3)

Com a aplicação do princípio de independência a todo o desenho, por omissão, um dado requisito individual especificado a mais do que um elemento, através da utilização do modificador (***nx***), deve ser avaliado individualmente, em cada um dos elementos de tamanho angular considerados como elementos separados, ver figura 6.79 a). No caso do requisito individual se aplicar a uma coleção de vários elementos geométricos separados e essa coleção for considerada como um elemento de tamanho angular único, deve especificar-se, em complemento, o modificador de especificação “**elemento de tamanho toleranciado comum**” (**CT**) e o requisito deve ser avaliado, em simultâneo, em todos os elementos, ver figura 6.79 b).



a) Elementos separados com avaliação individual    b) Coleção de elementos com tolerância comum

Figura 6.79 – Exemplos de tolerância aplicada a mais do que um elemento de tamanho angular (ISO 14405-3)

Quando não se aplica o operador de especificação ISO geral, por omissão, para as características de tamanho angular, devem utilizar-se modificadores de especificação (ver quadros 6.18 e 6.19), adequados ao estabelecimento da característica de tamanho angular apropriada, combinados de acordo com as regras definidas na ISO 14405-1, para tamanhos lineares.

Quando se aplica um requisito a uma peça flexível, o símbolo modificador **(F)** deve ser utilizado para indicar que a especificação se refere ao “estado livre” da peça, ver quadro 6.19.

Para mais indicações sobre o toleranciamento de tamanhos angulares, consultar também as normas ISO 2538-2 e ISO 3040.

## 6.6 Alguns exemplos das limitações do toleranciamento dimensional em dimensões que não sejam tamanhos

### 6.6.1 Generalidades

As dimensões toleranciadas que não sejam “tamanhos” são especificadas, de modo inequívoco, apenas no modelo nominal, definido na norma ISO 17450-1 e no capítulo 4 deste trabalho. Logo, a interpretação de tolerâncias dimensionais em peças reais constituídas por elementos com desvios geométricos de forma e angulares poderá dar origem a ambiguidades de especificação que escapam ao controlo do projetista, conforme foi já abordado na secção 6.2 deste texto.

Por sua vez, quando a função das peças e os processos produtivos utilizados tornam mais vantajosa a especificação de desvios limites  $\pm$ , em certos elementos constituintes e nomeadamente em **distâncias em que estão envolvidos apenas dois elementos**, os documentos normativos ISO 14405-2 e ISO/TR 16570 admitem a possibilidade de utilização de tolerâncias dimensionais nesses casos, apesar das inerentes ambiguidades desse procedimento.

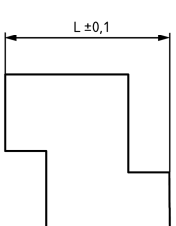
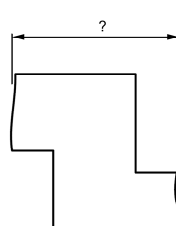
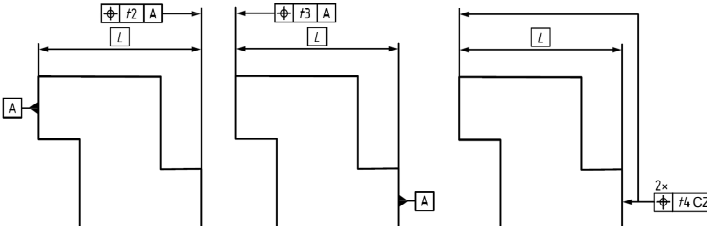
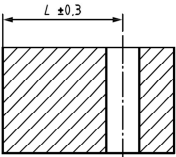
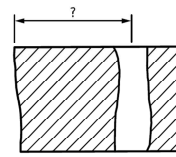
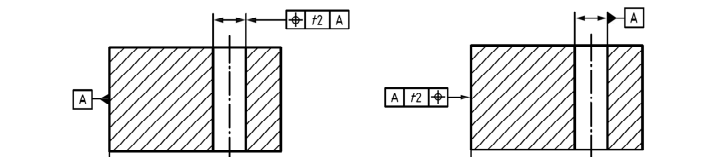
No entanto, um controlo eficaz da ambiguidade de especificação correspondente às diversas dimensões que não sejam “tamanhos” só pode ser efetuado através de uma utilização adequada de toleranciamento geométrico.

### 6.6.2 Exemplos de comparação entre especificações de toleranciamento $\pm$ ambíguo e de toleranciamento geométrico inequívoco

A norma ISO 14405-2 apresenta um conjunto de exemplos de utilização de tolerâncias geométricas, em alternativa ao toleranciamento dimensional, com vista a evitar a ambiguidade derivada da utilização de tolerâncias  $\pm$  em dimensões lineares e angulares que não sejam “tamanhos”. Deste modo, nestes casos, a variabilidade dimensional pode ser especificada por meio de toleranciamento dimensional  $\pm$  ou através de toleranciamento geométrico (ver quadro 6.21).

Em geral, os requisitos baseados em toleranciamento geométrico têm muito pouca ou nenhuma ambiguidade de especificação. Normalmente, com a utilização de tolerâncias geométricas, passa a ser possível indicar, de um modo inequívoco, várias soluções de especificação diferentes.

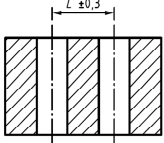
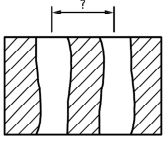
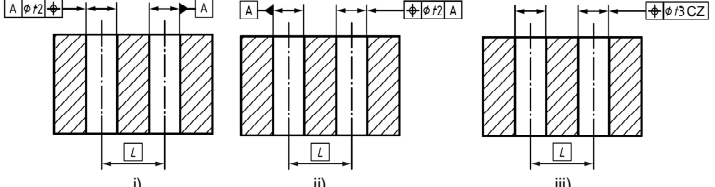
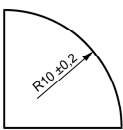

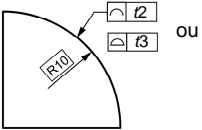
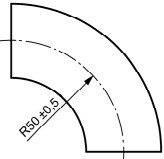
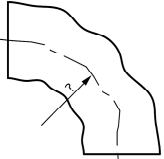
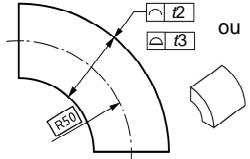
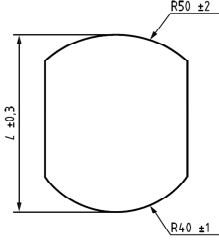
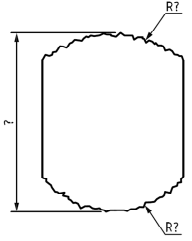
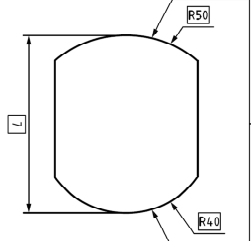
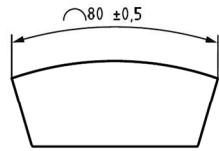
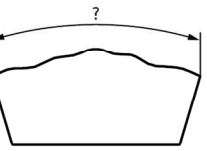
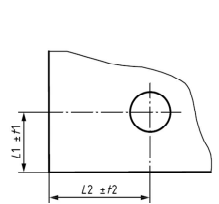
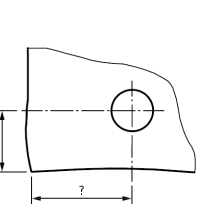
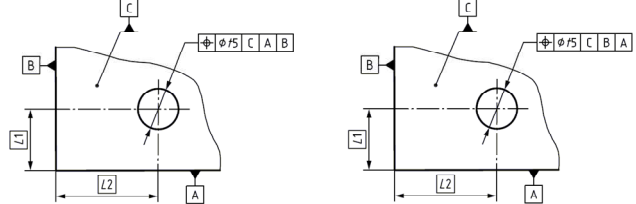
Quadro 6.21 – Comparação entre especificações de toleranciamento  $\pm$  e de toleranciamento geométrico – exemplos (ISO 14405-2)

Distância linear entre dois elementos integrais fazendo face em sentidos opostos		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	 <p>i) ii) iii)</p> <p>Em iii), a peça é alinhada no espaço considerando, em simultâneo, as duas superfícies planas verticais. Estas duas superfícies planas verticais são toleranciadas uma em relação à outra, através de zonas de tolerância de localização, a uma distância <math>L</math> entre si.</p> <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>
Distância linear entre um elemento integral e um elemento derivado		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	 <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>

(continua)

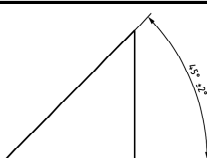
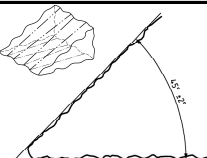
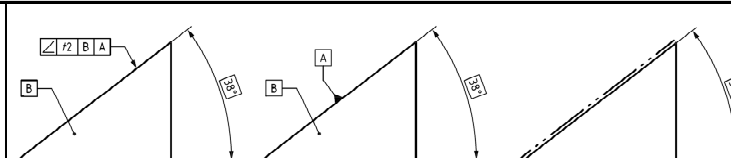
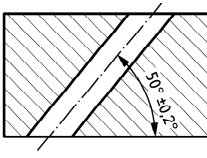
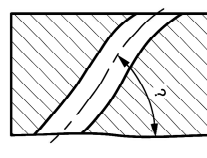
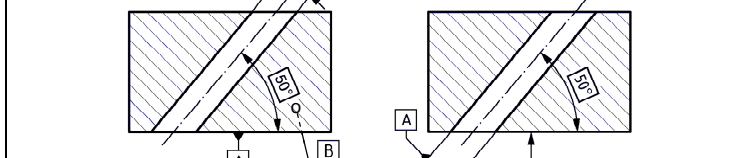
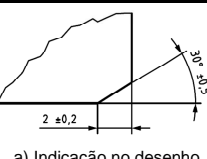
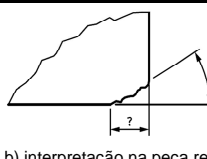
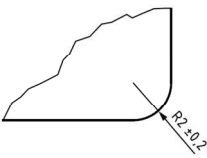
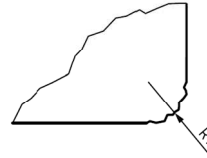


Quadro 6.21 – Comparação entre especificações de toleranciamento  $\pm$  e de toleranciamento geométrico – exemplos (ISO 14405-2) (continuação)

Distância linear entre dois elementos derivados		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	 <p>i) ii) iii)</p> <p>Em iii), apresenta-se uma solução com uma tolerância geométrica de localização para os eixos dos dois furos, um em relação ao outro, sem a indicação de qualquer referência especificada.</p> <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>
Dimensão de raio num elemento integral		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	 <p>ou</p> <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>
Dimensão de raio num elemento derivado		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	 <p>ou</p> <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>
Distância linear entre dois elementos integrais não planos		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	 <p>1) Indicador de zona de tolerância de um requisito de posição. 2) Indicador de zona de tolerância de um requisito de forma.</p> <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>
Comprimento de arco		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	<p>A indicação de dimensões de comprimento de arco com a utilização de tolerâncias <math>\pm</math> é ambígua numa peça real com desvios de forma e angulares. Este tipo de especificação não é recomendado. É preferível utilizar uma combinação de especificações (por exemplo, uma cota de raio e tolerâncias geométricas de forma).</p> <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>
Distâncias lineares em duas direções		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) interpretação na peça real</p>	 <p>O toleranciamento geométrico permite estabelecer uma ordem de precedência adequada para as referências especificadas estabelecidas.</p> <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>

(continua)

Quadro 6.21 – Comparação entre especificações de toleranciamento  $\pm$  e de toleranciamento geométrico – exemplos (ISO 14405-2) (conclusão)

Distância angular entre dois elementos integrais		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	 <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>
Distância angular entre um elemento integral e um elemento derivado		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	 <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>
Chanfros		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	<p>A especificação de chanfros, por meio de tolerâncias <math>\pm</math>, pode ser ambígua em peças reais com desvios de forma e angulares. Se esta ambiguidade de especificação não for aceitável, deve utilizar-se toleranciamento geométrico.</p> <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>
Arredondados		
 <p>a) Indicação no desenho</p>	 <p>b) Interpretação na peça real</p>	<p>A especificação de arredondados, por meio de tolerâncias <math>\pm</math>, pode ser ambígua em peças reais com desvios de forma e angulares. Se esta ambiguidade de especificação não for aceitável, deve utilizar-se toleranciamento geométrico.</p> <p>c) Exemplos de alternativas de toleranciamento geométrico inequívocas</p>

Os exemplos abordados, no quadro 6.21, confirmam que o toleranciamento geométrico é uma linguagem com uma gramática mais desenvolvida do que a do toleranciamento dimensional, permitindo assegurar uma diminuição das ambiguidades da descrição da função e de especificação, em peças reais sujeitas a desvios de forma e de orientação.

### 6.6.3 Exemplos de toleranciamentos ambíguos cobertos por outras normas

Algumas normas contêm regras de cotação e toleranciamento dimensional, com base em especificações de desvios limites  $\pm$ , para utilização em desenhos técnicos, que nem sempre são suficientes para assegurarem uma descrição inequívoca da geometria das peças reais. O relatório técnico ISO/TR 16570 apresenta alguns exemplos de casos em que, devido à existência de

ambiguidades significativas, o toleranciamento dimensional deve ser abandonado, em definitivo, passando a ser substituído por especificações baseadas em tolerâncias geométricas.

### 6.6.3.1 Distâncias lineares entre mais do que dois elementos de tamanho

As distâncias entre mais do que dois elementos de tamanho relacionados funcionalmente, entre si, devem ser especificadas através de toleranciamento geométrico de localização, em conformidade com a norma ISO 5458, e não pela especificação de desvios limites  $\pm$ , pelas seguintes razões:

As especificações de desvios limites  $\pm$  não limitam adequadamente os desvios dos elementos derivados extraídos (eixos reais), relativamente ao cilindro comum ou aos planos comuns das suas localizações nominais e aos ângulos retos entre esses planos comuns (ver figura 6.80).

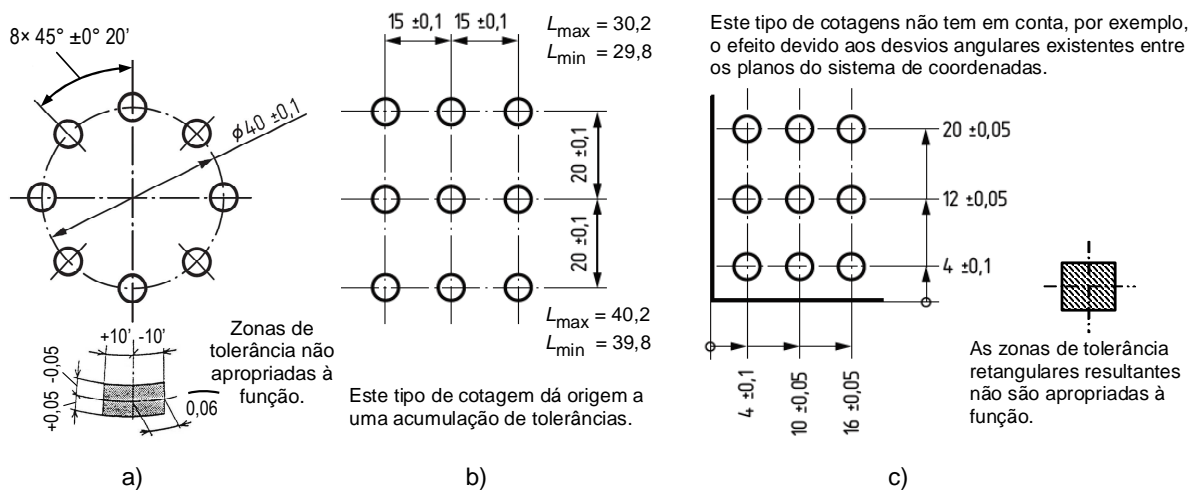


Figura 6.80 – Distâncias no interior de conjuntos de mais do que dois elementos de tamanho. Adaptado do ISO/TR 16570

As distâncias entre eixos de furos dispostos num cilindro comum das suas localizações nominais não podem ser toleranciadas, de um modo apropriado à função, através de especificações de desvios limites  $\pm$  [ver figura 6.80 a)].

Por sua vez, dimensões lineares e especificações de desvios limites  $\pm$ , mesmo quando estão relacionadas com a mesma referência [como no caso de cotagem com linhas de cota sobrepostas, da figura 6.80 c)], que têm uma origem comum], mas dispostas em duas ou três direções nominalmente perpendiculares, umas em relação às outras, são ambíguas. Este tipo de aplicações pressupõe a consideração de referências e, neste método, não existe qualquer modo de especificar uma ordem de prioridade para as referências em causa [ver figuras 6.80 b) e 6.80 c)].

Além disso, os desvios limites  $\pm$  não permitem fazer uma distinção entre elementos derivados individuais (eixos reais) de uma peça, representados em conjunto pela mesma linha de eixo, no desenho [ver figura 6.81 a)], embora as funções destes possam vir a necessitar de diferentes tolerâncias. Também neste âmbito, o toleranciamento geométrico de localização permite uma

especificação mais completa que dá resposta a este requisito, conforme se pode constatar no exemplo da figura 6.81 b) [H2].

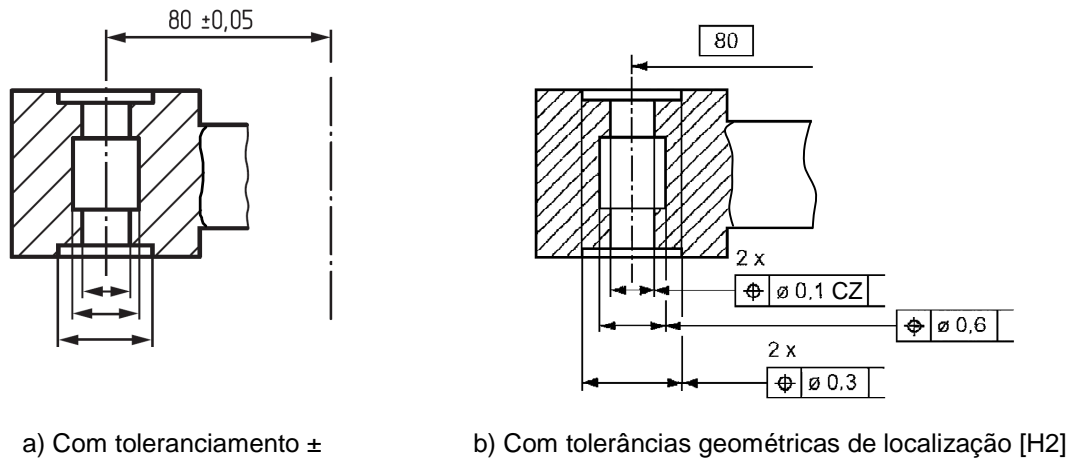


Figura 6.81 – Distâncias de elementos de tamanho representados pela mesma linha de eixo, no desenho

As especificações de desvios limites  $\pm$  também não permitem:

- O estabelecimento de referências especificadas comuns ou de sistemas de referências, assegurados pelo toleranciamento geométrico, que podem ser necessários para expressar diversas necessidades funcionais (ver figura 6.82).
- A especificação de zonas de tolerância cilíndricas (1), que resultam da função de montagem de peças cilíndricas e que são 57 % maiores do que as zonas de tolerância (2) resultantes do toleranciamento  $\pm$  (ver figura 6.82).

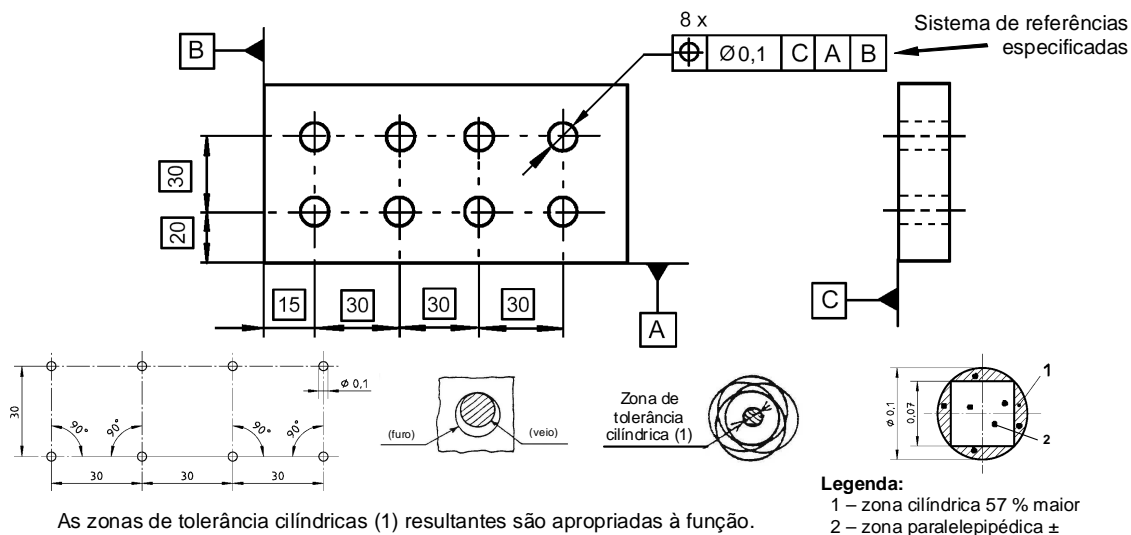


Figura 6.82 – Comparação de zonas de tolerância geométrica de localização entre elementos de tamanho cilíndricos com zonas de tolerância resultantes do toleranciamento  $\pm$

- A especificação de requisitos de máximo de matéria (MMR), de mínimo de matéria (LMR) e de elemento toleranciado projetado (P), que possibilitam um aumento dos desvios geométricos admissíveis sob certas condições (ver capítulos 7 e 8 deste texto).

Finalmente, as especificações de desvios limites  $\pm$ , em dimensões de ressaltos e distâncias para mais do que dois elementos, conduzem sempre a tolerâncias menores do que as resultantes do toleranciamento geométrico correspondente (ver ISO/TR 16570).

Presentemente, tendo em conta o contexto atrás descrito, o posicionamento de elementos por meio de dimensões (distâncias) toleranciadas com desvios  $\pm$  deixou de ter um significado preciso, uma vez que ele deriva de uma visão geométrica simplificada e unidimensional [S2].

### 6.6.3.2 Distância angular envolvendo elementos de tamanho

Ângulos entre elementos de tamanho (ver figura 6.83) ou entre um elemento de tamanho e um elemento plano (ver figura 6.84) devem ser toleranciados em conformidade com a norma ISO 1101, por exemplo através do toleranciamento geométrico de localização, e não através da especificação de desvios limites  $\pm$ , pelas razões a seguir aduzidas.

As distâncias angulares necessitam da determinação de uma referência primária e de uma referência secundária, para estabelecer o vértice (aresta do diedro) do ângulo.

Logo, os ângulos entre planos contendo eixos de furos não deverão ser toleranciados por especificações de desvios limites  $\pm$  consideradas apropriadas para a função (ver figura 6.83) [T1].

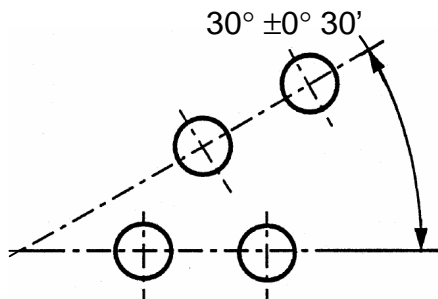


Figura 6.83 – Distância angular entre elementos de tamanho

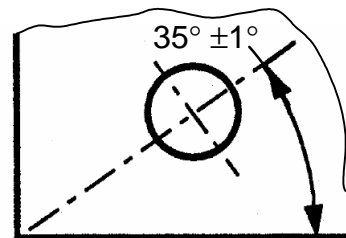


Figura 6.84 – Distância angular entre um elemento de tamanho e um elemento plano

Muitas vezes, o mesmo se aplica para ângulos entre mais do que um plano mediano, quando estes estão representados por apenas uma linha de eixo no desenho (ver figura 6.85).

No exemplo da figura 6.85 a), pode observar-se uma representação do posicionamento angular do furo superior da peça. Este toleranciamento dimensional angular não é o mais adequado porque a definição da posição do vértice do ângulo não é inequívoca (pode ser relacionada com os furos horizontais, com os dois planos horizontais, com o plano mediano dos dois planos verticais superiores, com o plano mediano dos dois planos verticais inferiores, com o plano mediano dos dois furos, ou seja, 6 localizações possíveis) [H2].

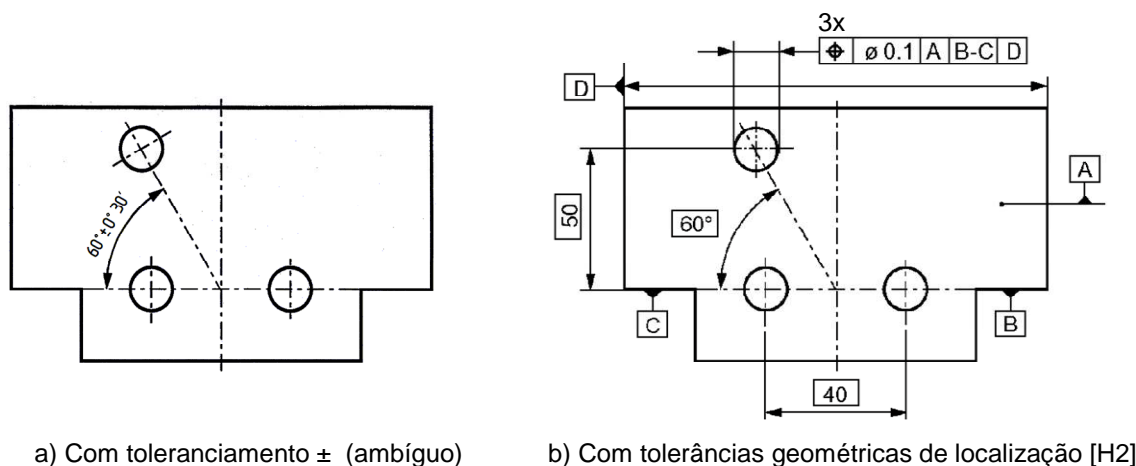


Figura 6.85 – Exemplo do toleranciamento da distância angular do eixo de um furo

Em alternativa, na figura 6.85 b), recorre-se ao toleranciamento geométrico de localização e a dimensões teoricamente exactas (enquadradas) para indicar, de um modo inequívoco, a posição correta do vértice do ângulo.

### 6.6.3.3 Distância angular entre dois elementos integrais

Na especificação da distância angular entre dois elementos integrais por meio de toleranciamento  $\pm$ , admitindo que o vértice (a aresta do diedro) pode ser localizado sobre um dos elementos considerado como elemento de referência, através da utilização do símbolo de origem  $\oplus$ , constata-se que a largura da zona de tolerância angular é variável e tende para zero, junto do vértice do ângulo (ver figura 6.86). Logo, a verificação das características geométricas nesta zona, resultantes deste método de especificação, é impraticável [S8, T1].

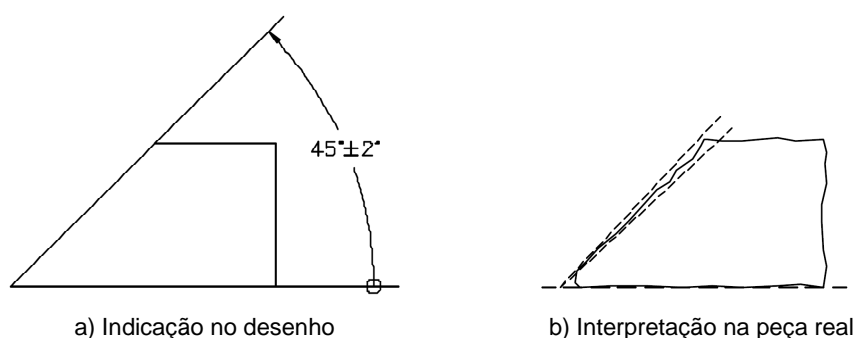


Figura 6.86 – Cotagem da distância angular entre dois elementos integrais com a utilização do símbolo de origem. Adaptada de [S8]

Por sua vez, se um elemento integral plano for situado (posicionado e orientado), em relação a um elemento de referência definido por intermédio de um símbolo de origem  $\oplus$ , através de uma combinação de uma dimensão linear e de uma dimensão angular com tolerâncias  $\pm$ , a superfície real integral deve ficar contida numa zona de tolerância definida por meio de dois planos não paralelos (ver figura 6.87).

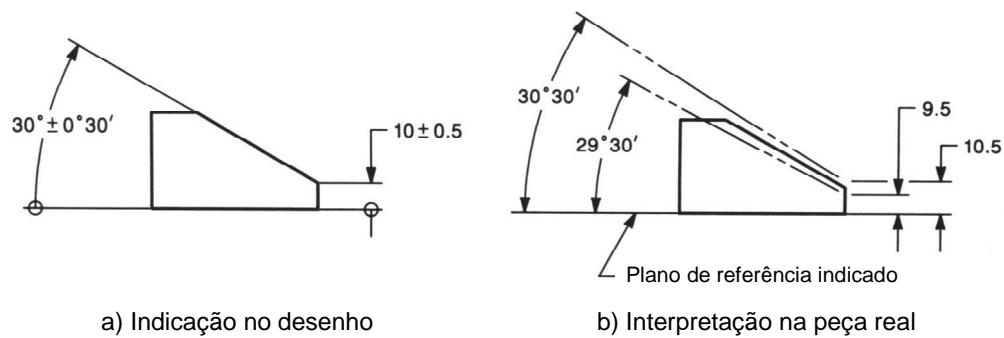


Figura 6.87 – Toleranciamento de uma distância angular entre dois elementos integrais utilizando uma combinação de dimensões angulares e lineares (ASME Y14.5-2009)

A largura desta zona de tolerância cresce à medida que aumenta a distância em relação ao vértice do ângulo. A superfície controlada através da dimensão angular poderá estar em qualquer parte no interior da zona de tolerância, havendo apenas a restrição de que o valor do seu ângulo deve estar compreendido entre  $29^\circ 30'$  e  $30^\circ 30'$ .

As tolerâncias angulares  $\pm$  aplicam-se apenas ao ângulo medido entre os dois elementos, não possibilitando, desse modo, o estabelecimento de qualquer zona de tolerância para limitar a inclinação de um elemento plano tolerenciado, uma vez que, nesse caso, seria possível que esse elemento pudesse estar orientado, dentro dessa zona, segundo um ângulo com um valor fora da tolerância.

Os desvios de forma dos elementos dificultam a sua medição e diferentes alinhamentos da escala de medição dão origem a diferentes medidas. No entanto, apesar das limitações, as tolerâncias angulares  $\pm$  são muitas vezes suficientes para caracterizar relações não críticas, se os metrologistas forem capazes de efetuar medições com uma repetibilidade e reprodutibilidade adequadas [S8].

Se a definição da orientação de um elemento for mais crítica e os métodos atrás analisados forem demasiado ambíguos, deverá ser especificada uma tolerância geométrica de inclinação (“*angularity tolerance*”), ver figura 6.88.

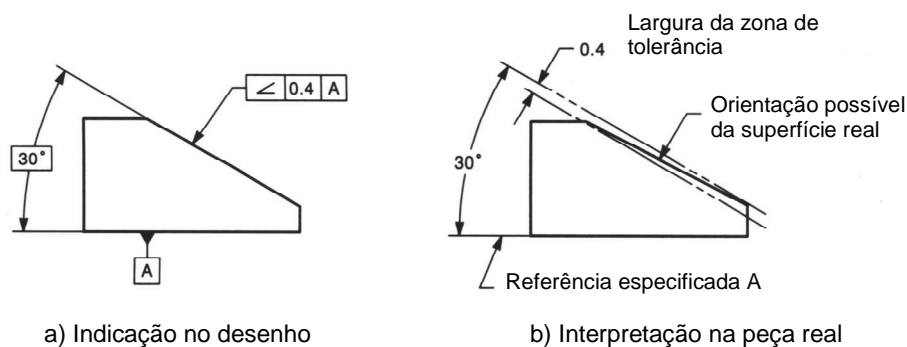


Figura 6.88 – Toleranciamento geométrico de inclinação de uma superfície plana em relação a uma superfície plana de referência (ASME Y14.5-2009, equivalente à ISO 1101:2012)

Tendo em conta que a tolerância angular especificada por intermédio de um tamanho linear (valor da tolerância geométrica de inclinação) é sempre determinada em relação a uma referência especificada, é visível que a correspondente tolerância angular  $\pm$  deverá estar dependente do comprimento do lado do ângulo e não do valor do próprio ângulo [T1] (ver figura 6.89).

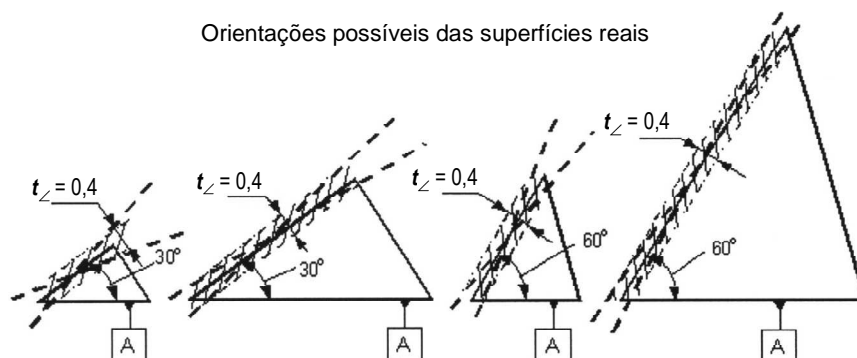


Figura 6.89 – Verificação da possível dependência dos valores dos desvios angulares em relação ao comprimento do lado do ângulo e ao valor do próprio ângulo [T1]

A observação da figura 6.89 permite constatar que, para um comprimento maior do lado de um determinado ângulo, é possível especificar um aumento da largura da zona de tolerância geométrica de inclinação, sem que daí resulte um aumento dos correspondentes desvios limites angulares  $\pm$  da superfície real que forma o ângulo.

## 6.7 Considerações finais

A necessidade de especificação de **tolerâncias dimensionais** em peças obtidas por trabalho mecânico surgiu, sobretudo, em resultado da introdução do requisito de intermutabilidade entre peças produzidas em série e da inerente inexatidão dos métodos de fabricação, associadas ao facto da “exatidão” dimensional ter sido considerada desnecessária na maioria das peças.

O desenho, em conjunto com as máquinas-ferramenta, passou a ser um dos meios da massificação da produção, dos produtos e do trabalho. A cotação e o toleranciamento sistemáticos tornaram-se indispensáveis em todas as situações onde a conceção e a fabricação estejam completamente separadas, de modo que as peças possam ser produzidas, a partir da informação dada nos desenhos, e montadas sem ter de se recorrer a qualquer operação de ajustagem, realizada por um técnico especializado.

A necessidade de racionalizar a organização da produção das empresas e de fazer face ao crescente “outsourcing” de tarefas produtivas, exigiu que o desenho técnico e os sistemas de tolerâncias fossem objeto de trabalhos de normalização relevantes, ao longo do século XX.



Nas primeiras décadas, com os meios de produção então disponíveis, as peças produzidas podiam ser consideradas “geometricamente perfeitas”, quando se comparavam as suas características geométricas com as correspondentes magnitudes das tolerâncias de trabalho a que estavam sujeitas as suas dimensões inscritas nos desenhos. Atualmente, os desvios geométricos resultantes do processo produtivo podem ser relativamente maiores do que os correspondentes desvios dimensionais, de tal modo que dificultem a função da peça, bem como a cotagem e o toleranciamento dimensionais. Logo, os desvios geométricos de forma devem ser sujeitos a limitações maiores do que no passado, por via da especificação de tolerâncias geométricas adequadas, de modo a garantir-se uma correta função da peça e a relevância da cotagem e toleranciamento dimensionais.

Houve uma mudança de posição assinalável entre desvios dimensionais e desvios geométricos derivados da fabricação. A anterior geração de normas ISO de cotagem e toleranciamento dimensionais trabalhava apenas com peças teoricamente corretas – como se não ocorressem desvios de forma e angulares – daí resultando desenhos que não especificavam de uma maneira suficientemente precisa o que devia ser requerido à geometria, de modo a assegurar-se a função desejada. As normas mais recentes pretendem dar resposta às novas necessidades decorrentes do progresso tecnológico, desenvolvendo **uma nova linguagem de especificação geométrica que permita uma diminuição significativa das ambiguidades de descrição da função e de especificação.**

Existe um conjunto significativo de diferentes tipos de dimensões. No entanto, **a especificação de tolerâncias  $\pm$  em quaisquer dimensões que não sejam “tamanhos” é um requisito ambíguo**, uma vez que não pode ser definida de um modo inequívoco em peças reais. Não existe uma solução universal para a resolução deste tipo de ambiguidades que resultam da existência, nas peças, de desvios geométricos de forma e angulares que, embora não sejam limitados através do toleranciamento dimensional, influenciam o resultado da avaliação das dimensões em causa.

Esta ambiguidade de especificação dá origem a que possa ser feita mais do que uma interpretação do requisito indicado num desenho ou modelo 3D. Uma caracterização inequívoca da especificação considerada mais adequada para a função pretendida só pode ser materializada através de toleranciamento geométrico que é uma linguagem mais robusta, com uma gramática mais desenvolvida.

De acordo com o **princípio de independência**, por omissão, uma dimensão linear toleranciada, inscrita num desenho, limita apenas os tamanhos locais reais (tamanhos entre dois pontos opostos) de um **“elemento de tamanho”**, mas não os seus desvios de forma. Na nova linguagem ISO, este tipo de tamanhos são definidos inequivocamente, em conformidade com a norma ISO 17450-3, por meio de procedimentos numéricos a implementar em máquinas de medição de coordenadas.

A atual norma ISO 14405-1 fornece, aos projetistas, desde 2010, um conjunto adicional de ferramentas de especificação, no âmbito do estabelecimento de novos tipos de **tamanhos lineares**,

que passaram a permitir uma definição com grande detalhe de diferentes requisitos funcionais em elementos de peças, para além da função de ajustamento.

Esta norma estabelece o “**tamanho local entre dois pontos**” como especificação ISO geral, por omissão (“*by default*”), para tamanhos lineares, define regras para a indicação de especificações ISO gerais, por omissão, específicas do desenho, que modificam a especificação ISO geral, por omissão, p. ex. através de inscrições do tipo “Tamanho ISO 14405-1 **E**”, e fixa um conjunto de símbolos modificadores de especificação que permitem a indicação de especificações GPS especiais, que adicionam informação complementar, p. ex. o modificador de especificação **GN**, à especificação ISO de base, indicada individualmente para o tamanho linear de um elemento geométrico do desenho, de modo a modificar o conjunto de operações definido por omissão, tal como, p. ex.  $10 \pm 0,1$  **GN**.

Os conceitos expressos na norma ISO 14405-1 assentam numa metrologia digital computadorizada. A verificação de um tamanho linear entre dois pontos, recorrendo a um instrumento de metrologia convencional (p. ex. a um micrómetro), será sempre realizada com uma incerteza significativa do método de medição. A referência [C5] assinala o compromisso assumido por várias empresas de desenvolvimento e comercialização de *software* de CAD para introduzirem estes novos conceitos GPS nas novas versões de sistemas de CAD 2D e 3D em preparação para lançamento no mercado.

Neste campo, os fabricantes de rolamentos regem-se por princípios de toleranciamento particulares, uma vez que os anéis de muitos dos rolamentos são peças flexíveis que se deformam facilmente devido à sua pequena espessura e, por isso, antes da montagem, podem ter desvios de forma (ovalizações) e dimensões que excedem os valores especificados. No entanto, após a sua montagem, nos veios e nas caixas de alojamento, com eles conjugados, adquirem uma configuração adequada e dimensões dentro dos limites admissíveis. Logo, as classes de tolerância utilizadas nos rolamentos não têm correspondência com as classes do sistema ISO de tolerâncias (ISO 286).

Uma vez que, para a interpretação das especificações geométricas tradicionalmente utilizadas para caracterizar os rolamentos, havia a necessidade de remeter o utilizador para detalhes adicionais indicados apenas em normas específicas, o Comité técnico ISO/TC 4 – “*Rolling bearings*” decidiu adaptar as indicações existentes sobre tolerâncias para rolamentos à simbologia e definições do Comité técnico ISO/TC 213. No que diz respeito às tolerâncias dimensionais, esta decisão justificou a consideração de novos tipos de tamanhos (“tamanhos por ordenação”), no âmbito da ISO 14405-1. Ao incorporar os símbolos modificadores de tamanho adequados, em conformidade com esta norma, os desenhos de definição de rolamentos passam a permitir uma interpretação direta das especificações em causa, sem haver a necessidade de consultar pormenores mencionados em documentos adicionais, o que permite evitar interpretações e procedimentos ambíguos, sobretudo durante as operações de verificação. No entanto, ainda recentemente, Concheri [C5] alertava para que, em alguns países, havia a necessidade de promover ações de formação neste domínio, junto das empresas produtoras de rolamentos.

Na atual linguagem GPS ISO, a especificação de uma dimensão do tipo “tamanho linear”, com base numa classe de tolerância codificada de acordo com o “**Sistema ISO de tolerâncias e desvios**” (ISO 286), em elementos de tamanho do tipo “cilindro” e do tipo “duas superfícies planas paralelas opostas”, passou a ser interpretada, por omissão, como sendo um “tamanho entre dois pontos”. Neste contexto, o termo “intervalo de tolerância” foi adotado em substituição da expressão “zona de tolerância”, que é mais adequada para exprimir uma noção de espaço ou de área. Logo, as classes de tolerância dos tamanhos destes tipos de elementos, destinados a preencher uma função de ajustamento entre peças conjugadas, passaram a ter de ser indicadas, nos desenhos, em conjunto com o símbolo modificador  $\textcircled{E}$ , relativo ao “requisito de envolvente”, de modo a poderem traduzir adequadamente uma condição de montagem local.

Por sua vez, a norma ISO 14405-3, atualmente em fase projeto, vai fornecer aos projetistas um conjunto substancial de novas ferramentas de especificação, para a indicação de diversos tipos de **tamanhos angulares** em elementos das peças, de modo que diferentes requisitos funcionais possam vir a poder ser definidos com grande detalhe. Os novos conceitos estabelecidos nesta norma só poderão ser verificados, adequadamente, através de sistemas de metrologia digital computadorizada, munidos de algoritmos para o ajuste numérico dos elementos associados aos elementos extraídos.

Esta nova norma vai estabelecer o “**tamanho angular entre duas linhas**” como especificação ISO geral, por omissão, para tamanhos angulares, definir regras para a indicação de especificações ISO gerais, por omissão, específicas do desenho, que modificam a especificação ISO geral, por omissão, p. ex. através de inscrições do tipo “Tamanho angular ISO 14405-3  $\textcircled{LG}$ ”, e fixar um conjunto de símbolos modificadores de especificação que permitam a indicação de especificações GPS especiais, que adicionem informação complementar, p. ex. o modificador de especificação  $\textcircled{GG}$  à especificação ISO de base, indicada individualmente para o tamanho angular de um elemento geométrico do desenho, de modo a modificar o conjunto de operações definido por omissão, tal como, p. ex.  $45^\circ \pm 2^\circ \textcircled{GG}$ .

**As dimensões toleranciadas que não sejam “tamanhos” são especificadas, de modo inequívoco, apenas no modelo nominal.** No entanto, quando a função das peças permite desvios para a forma maiores do que para o posicionamento do ponto mais saliente da superfície material, há um conjunto de processos produtivos correntes que beneficiam com a indicação de especificações de dimensões com desvios limites  $\pm$ , nomeadamente em **distâncias em que estão envolvidos apenas dois elementos**, apesar das inerentes ambiguidades desse procedimento.

Finalmente, as especificações de desvios limites  $\pm$ , em dimensões de ressaltos e distâncias para mais do que dois elementos, conduzem sempre a tolerâncias menores do que as resultantes do toleranciamento geométrico correspondente (ver ISO/TR 16570). Presentemente, tendo em conta o contexto descrito neste texto, o posicionamento de elementos por meio de dimensões (distâncias) toleranciadas com desvios  $\pm$  deixou de ter um significado preciso, uma vez que ele deriva de uma visão geométrica simplificada e unidimensional [S2].

O clássico toleranciamento  $\pm$  de dimensões (tamanhos), tratado neste capítulo, é um caso particular da “especificação por dimensão” (“*specification by dimension*”), também designada por “toleranciamento paramétrico” (“*parametric tolerancing*”) [B4, H3], já abordada, em termos gerais, na secção 4.7.2 deste trabalho.

No entanto, no campo do toleranciamento dimensional, para além da questão da “especificação de tolerâncias” aqui exposta, não pode deixar de ser feita referência a algumas linhas de investigação importantes que foram sendo desenvolvidas, ao longo das últimas décadas, nomeadamente nos seguintes domínios [H3]:

- A “análise de tolerâncias” (“*tolerance analysis*”) que permite verificar a funcionalidade adequada de uma conceção, tendo em conta a variabilidade das peças individuais. Pode recorrer a métodos determinísticos ou estatísticos e os modelos a analisar podem ser 1D, 2D ou 3D.
- A “síntese ou repartição de tolerâncias” (“*tolerance synthesis or allocation*”) que, a partir da especificação da tolerância de uma condição funcional, tenta obter as tolerâncias das dimensões dos elementos componentes individuais. A maioria dos métodos utilizados são baseados em modelos de otimização da função tolerância-custo, mas, no entanto, a sua aplicação ao nível da indústria é limitada, devido a tentarem tirar partido de um conhecimento superficial dos processos, obtido por via de manuais de tecnologia.
- A “transferência de cotas” (“*tolerance transfer*”) que procura transferir requisitos de tolerância da fase de conceção para a fase de fabricação, ao mesmo tempo que respeita as capacidades das máquinas, tira todo o partido concedido pela conceção e tem em conta desvios de fabricação, desvios de montagem e desgaste das ferramentas. As aplicações para 2D e 3D não são muito significativas.

Alguns autores [H3, H2, B4] não fazem distinção entre “análise de tolerâncias” e “síntese ou repartição de tolerâncias”, abordando estas questões sob o título genérico de “*tolerance chain techniques*” (en) ou “*chaînes de cotes*” (fr), isto é por via do “estabelecimento de cadeias de cotas”. Na atual linguagem GPS, a influência dos desvios geométricos existentes nas diferentes peças componentes não pode ser ignorada neste tipo de análises. Henzold [H2], por exemplo, aborda este tema, no âmbito de um estudo de “cadeias de cotas unidimensionais”.

## 6.8 Referências

- [A1] – ABBOTT, W. – *The Dimensioning of Engineering Drawings*. Glasgow: Blackie & Son, Ltd., 1953.
- [A2] – AHLSTRÖM, G. – *The Edison of Sweden – C.E. Johansson and the ‘Standards of Standard’* [Em linha]. Lund Papers in Economic History. Sweden: Department of Economic History, Lund University. 2001, 71, 9 p. ISSN 1101-346X. [Consult. 15 jul. 2014]. Disponível em WWW: <URL:[http://www.ekh.lu.se/media/ekh/forskning/lund\\_papers\\_in\\_economic\\_history/71.pdf](http://www.ekh.lu.se/media/ekh/forskning/lund_papers_in_economic_history/71.pdf)>.

- [A3] – ALMACINHA, J. A.; SIMÕES MORAIS, J. M. – *Desenho Técnico*. Texto de apoio às aulas teóricas e coleção de exercícios a executar nas aulas práticas da unidade curricular de Desenho Técnico. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FEUP. Porto: AEFEUP Editorial. 8ª ed. 2013.
- [B1] – BESTER, A. J. – *No limits: Georg Schlesinger* [Em linha]. Rev. 3. South Africa, 2009, 7 p. [Consult. 2 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.allanjbester.co.za/personal/machining/doc/No%20Limits\\_Georg%20Schlesinger.pdf](http://www.allanjbester.co.za/personal/machining/doc/No%20Limits_Georg%20Schlesinger.pdf)>.
- [B2] – BIALAS, S. [et al.] – *Computer Aided ISO System of Limits and Fits*. XVII Deutsch-Polnisches Wissenschaftliches Seminar, Köln 28 Juni – 01 Juli 2005 – Proceedings 2/2005. ISSN 1612-9040.
- [B3] – BOOKER, P. J. – *A History of Engineering Drawing*. London: Chatto & Windus, Ltd., 1963.
- [B4] – BOURDET, P.; SCHNEIDER, F. – *Spécification Géométrique des Produits. Cotation et tolérancement ISO*. Paris.: Dunod, 2007, cap. 2. ISBN 978-2-10-006919-4.
- [B5] – *Business Plan of ISO/TC 213 – Dimensional and geometrical product specifications and verification* [Em linha]. Versão 5 Draft 1. ISO, 2008-01-09, 14 p. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO\\_TC\\_213\\_Dimensional\\_and\\_geometrical\\_product\\_specifications\\_and\\_verification\\_.pdf?nodeid=999295&vernum=-2](http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO_TC_213_Dimensional_and_geometrical_product_specifications_and_verification_.pdf?nodeid=999295&vernum=-2)>.
- [C1] – CASTELL, A.; DUPONT, A. – *Métrologie appliquée aux fabrications mécaniques*. 3ª ed. Paris: Éditeur Desforges, 1978.
- [C2] – CHARPANTIER, A. [et al.] – *Exploitation du concept GPS et de la normalisation pour la Spécification Géométrique des Produits* [Em linha]. Livrets 1, 2 et 3. Centre d'Etudes et de Recherche Pédagogique de l'Enseignement Technique (CERPET). Ministère de l'Education Nationale de la Recherche et de la Technologie. 1999, 75 p. [Consult. 2 fev. 2005]. Disponível em WWW:<URL:<http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/3787/3787-tolerancement-gps.pdf>>.
- [C3] – CHEVALIER, A. – *Guide du dessinateur industriel*. Paris: Hachette Technique, 1998.
- [C4] – COHEN, Y. – *Ernest Mattern, les automobiles Peugeot et le pays de Montbéliard industriel, avant et pendant la guerre de 1914-1918: composition sur une pratique d'organisateur*. Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> cycle. Besançon: Université de Franche-Comté, 1981.
- [C5] – CONCHERI, G. – *Le nuove norme impongono un cambio radicale dell'insegnamento del disegno* [Em linha]. Giornata Naz. ADM – La rivoluzione dell'insegnamento del disegno: le nuove normative ISO e ASME. Torino, 28 maggio 2014. [Consult. 2 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://adm.ing.unibo.it/Files/Concheri\\_Giornata\\_Naz\\_ADM\\_28mag14.pdf](http://adm.ing.unibo.it/Files/Concheri_Giornata_Naz_ADM_28mag14.pdf)>.
- [C6] – CONWAY, H. G. – *The Requirements of a Good Tolerance System* [Em linha]. The Engineer. London. 1951, Vol. CXCII, July to December, p. 76-79. [Consult. 14 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.gracesguide.co.uk/images/e/ea/Er19510720.pdf>>.
- [C7] – CUNHA, V. – *Desenho Técnico*. 14ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2008.
- [D1] – DEFORGE, Y. – *Le Graphisme technique, son histoire et son enseignement*. Collection Milieux. Seyssel: Editions du Champ Vallon, 1981. ISBN 2-903528-11-X.
- [D2] – DOVMARK, J. – *New interesting concepts from ISO/TC 213* [Em linha]. CMM Club Italia Seminar. Milan. Italy. Sept. 2000. [Consult. 2 nov. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://isotc213.ds.dk/article/what.htm>>.

- [D3] – DUPUIS, A.; LOMBARD, J. – *Cours de dessin industriel – Tome II – Technique du dessin industriel*. Paris: H. Dunod et E. PINAT éditeurs, 1918.
- [F1] – FRENCH, T. E.; VIERCK, C. J.; FOSTER, R. J. – *Engineering Drawing and Graphic Technology*. 14<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [G1] – GEUS, D.; KILLMAIER, T.; WECKENMANN, A. – *Designation and interpretation of geometrical tolerances*. In HUMIENNY, Z. [et al.] – *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House, 2001, cap. 17. ISBN 83-912190-8-9.
- [G2] – GEUS, D.; KILLMAIER, T.; WECKENMANN, A. – *Inspection of dimensional and geometrical deviations*. In HUMIENNY, Z. [et al.] – *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House, 2001, cap. 23. ISBN 83-912190-8-9.
- [G3] – GROEN, P. de – *An Introduction to Total Least-Squares* [Em linha]. Nieuw Archief voor Wiskunde, Vierde serie, deel 14, 1996, p. 237-253. [Consult. 8 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://arxiv.org/pdf/math/9805076v1.pdf>>.
- [H1] – HARTMANN, W.; WECKENMANN, A. – *Function-Oriented Dimensional Metrology – More than Determining Size and Shape* [Em linha]. Proceedings of the AMA – Association for Sensors and Measurement Conferences 2013 – SENSOR 2013. DOI 10.5162/sensor2013/B6.1, p. 285-290. [Consult. 3 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ama-science.org%2Fproceedings%2FgetFile%2FZGHkZD%3D%3D&ei=6FTGU4WUB-fY0QXch4C4CQ&usq=AFQjCNE88gd3rss22y5N5rkje4V8mKezmw&bvm=bv.71126742,d.ZGU>>.
- [H2] – HENZOLD, G. – *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. 2<sup>a</sup> ed. U.K.: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [H3] – HONG, Y. S.; CHANG, T.-C. – *A comprehensive review of tolerancing research* [Em linha]. Intern. Journal of Production Research. UK: Taylor & Francis Ltd. 2002, vol. 40, nº 11, p. 2425-2459. DOI: 10.1080/00207540210128242. [Consult. 20 nov. 2011]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207540210128242>>.
- [J1] – JAIN, K. C.; CHITALE, A. K. – *Textbook of Production Engineering*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010.
- [K1] – KNYAZYEV, M. K. [et al.] – *Basics of Interchangeability*. Summary lectures. Kharkiv Aviation Institute. Ministry of Education, Science, Youth and Sports of Ukraine. Kharkiv, 2012.
- [K2] – KRULIKOWSKI, A. – *Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing*. 2<sup>a</sup> ed. USA: Delmar Publishers edition, 1998. ISBN 0-8273-7995-1.
- [K3] – KUERT, W. – *The Founding of ISO – “Things are going the right way!”* [Em linha]. Friendship Among Equals – Recollections from ISO's first fifty years. Switzerland: ISO, 1997, p. 15-21. ISBN 92-67-10260-5. [Consult. 2 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.iso.org/iso/2012\\_friendship\\_among\\_equals.pdf](http://www.iso.org/iso/2012_friendship_among_equals.pdf)>.
- [K4] – KVERNELAND, K. O. – *Metric Standards for Worldwide Manufacturing* [Em linha]. 2012 Electronic 8 th Edition. GO metricUSA<sup>TM</sup>.org, Inc., Statesville, North Carolina, USA, 2012. ISBN 0-9744477-7-3 (e-book). [Consult. 2 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.metric-bsp.com/METRIC%20STANDARDS%20for%20Worldwide%20Manufacturing%20summaries.pdf>>.
- [L1] – LÉVESQUE, B. – *A continuous tolerance system* [Em linha]. Precision Engineering. New York: Elsevier Science Inc. 1996, vol. 19, nº 1, p. 19-27. [Consult. 8 abr. 2006]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0141635996000037>>.



- [L2] – LOPES, O. – *Tecnologia Mecânica – Elementos para Fabricação Mecânica em Série*. S. Paulo: Editora Edgard Blücher. Ltda., 1983.
- [M1] – MANFÈ, G.; POZZA, R.; SCARATO, G. – *Desenho Técnico Mecânico*. S. Paulo: Hemus-Livraria Edit. Ltda, vol 1, 1977.
- [M2] – MATEOS, A. G. – *Tolerâncias e ajustes*. S. Paulo: Editora Polígono, 1974.
- [M3] – MORSE, E. [et al.] – *Metrological Challenges introduced by new tolerancing standards* [Em linha]. Measurement Science and Technology. UK: IOP Publishing Ltd. 2014, 25, 6 p. [Consult. 8 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://iopscience.iop.org/0957-0233/25/6/064001/pdf/0957-0233\\_25\\_6\\_064001.pdf](http://iopscience.iop.org/0957-0233/25/6/064001/pdf/0957-0233_25_6_064001.pdf)>.
- [N1] – NIELSEN, H. S. – *Specifications, operators and uncertainties* [Em linha]. 8th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing – Managing Geometric Uncertainty in the Product Lifecycle. April 28-29, 2003, Univ. of North Caroline, Charlotte, USA. [Consult. 25 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://isotc213.ds.dk/article/CIRP%20Specifications%20operators%20and%20uncertainties.pdf>>.
- [N2] – NIELSEN, H. S. – *Communicating Functional Requirements with GD&T* [Em linha]. Proceedings of the 2004 International Dimensional Metrology Workshop. Nashville, Tennessee, USA. [Consult. 25 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.hn-metrology.com/Papers/Communicating%20functional%20requirements%20with%20GDT.pdf>>; slides em WWW:<URL:<http://www.hn-metrology.com/Papers/Communicating%20functional%20requirements.pdf>>.
- [N3] – NIEMANN, G. – *Elementos de Máquinas*. S. Paulo: Editora Edgard Blücher. Ltda., vol 1, 1971.
- [P1] – PALMER, C. F. – *Controlo Total de Qualidade*. S. Paulo: Editora Edgard Blücher. Ltda., 1974.
- [P2] – POITOU, J-P. – *Dessin technique et division du travail* [Em linha]. Culture Technique – Les Ingénieurs. France: Éditions CRCT. 1984, 12, p. 196-207. ISSN 0223-4386. [Consult. 15 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/31638/C%26T\\_1984\\_12\\_197.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/31638/C%26T_1984_12_197.pdf?sequence=1)>.
- [R1] – RANDALL, R. – *Quality Thrust*. In DRAKE, Jr, P. J. – *Dimensioning and Tolerancing Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1999, cap. 1, p. 1-10. ISBN 0-07-018131-4.
- [S1] – SCHNEIDER, F. – *Tolérancement Géométrique: Problématique*. IUFM de Lorraine. Metz: Université de Metz. 2002. 25 p.
- [S2] – SCHNEIDER, F. – *Tolérancement Géométrique: Interprétation*. IUFM de Lorraine. Metz: Université de Metz, 2005. 106 p.
- [S3] – SHAKARJI, C. M.; SRINIVASAN, V. – *Theory and Algorithms for Weighted Total Least-Squares Fitting of Lines, Planes, and Parallel Planes to Support Tolerancing Standards* [Em linha]. Journal of Computing and Information Science in Engineering. USA: ASME. 2013, vol. 13, 11 p. [Consult. 8 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.nist.gov/customcf/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=912180](http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=912180)>.
- [S4] – SILVA, A.; RIBEIRO, C. T.; DIAS, J.; SOUSA, L. – *Desenho Técnico Moderno*. 4ª ed. Lisboa: Lidel – edições técnicas, Lda, 2004.
- [S5] – SILVA, D. C.; PASIN, A. O.; MARQUES, L. H. – *Curso Básico de GD&T EMBRAER: Segundo a norma ASME Y14.5M-1994 (NE 03-073)*. Projeto Análise de Tolerância. Embraer. Rev. B. Março de 2003.

- [S6] – SIMÕES MORAIS, J. M. – *Desenho Técnico Básico-3*. 24ª ed. Porto: Porto Editora Lda, 2007.
- [S7] – SRINIVASAN, V. – *Reflections on the role of science in the evolution of dimensioning and tolerancing standards* [Em linha]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. UK: IMechE. 2013, 227, p. 3-11. [Consult. 8 abr. 2013]. Disponível em WWW:<URL:<http://pib.sagepub.com/content/227/1/3.full.pdf>>.
- [S8] – STITES, W. M.; DRAKE, P. – *Geometric Dimensioning and Tolerancing*. In DRAKE, Jr, P. J. – *Dimensioning and Tolerancing Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1999, cap. 5, p. 1-166. ISBN 0-07-018131-4.
- [T1] – TAMRE, M. – *Tolerances of angles and cones*. In HUMIENNY, Z. [et al.] – *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House, 2001, cap. 14. ISBN 83-912190-8-9.
- [U1] – UMARAS, E. – *Tolerâncias Dimensionais em conjuntos mecânicos: Estudo e Proposta para Otimização* [Em linha]. Dissertação de Mestrado. S. Paulo: Escola Politécnica da USP, 2010. 150 p. [Consult. 8 mai. 2013]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.google.pt/url?url=http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-20102010-153205/publico/Dissertacao\\_Eduardo\\_Umaras.pdf&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0CBkQFjABahUKEwiqqP\\_Etu\\_GAhWJB9sKHerKCSA&usq=AFQjCNEJlxabi4pUMZeMTk5FbVzOs\\_zEXA](http://www.google.pt/url?url=http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-20102010-153205/publico/Dissertacao_Eduardo_Umaras.pdf&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0CBkQFjABahUKEwiqqP_Etu_GAhWJB9sKHerKCSA&usq=AFQjCNEJlxabi4pUMZeMTk5FbVzOs_zEXA)>.
- [V1] – VOELCKER, H. B. – *The current state of affairs in dimensional tolerancing: 1997* [Em linha]. Integrated Manufacturing Systems. USA: MCB University Press. 1998, vol. 9, nº 4, p. 205-217. ISSN 00957-6061. [Consult. 3 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=850763>>.
- [V2] – VOELCKER, H. B. – *Whither “size” in geometric tolerancing?* [Em linha]. Proc. ASPE Summer Topical Meeting on Tolerance Modeling and Analysis. University of North Caroline. Charlotte. USA. ASPE Press, Raleigh, NC, July 2002, 6 p. [Consult. 3 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.alvarestech.com/temp/nist2010/joao/HBVsize.pdf>>.
- [W1] – WECKENMANN, A.; GEWANDE, B. – *Koordinatenmeßtechnik – Flexible Meßstrategien für Maß, Form und Lage*. Carl Hanser Verlag, 1999.
- [W2] – WECKENMANN, A.; HARTMANN, W. – *Function-oriented Measurements – the Path from Macro to Micro and Nano Range* [Em linha]. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Manufacturing Engineering Society International Conference. Zaragoza. June 2013, 10 p. [Consult. 3 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://mesic2013.unizar.es/proceedings/documents/244.pdf>>.
- [W3] – WIESNER, H. – *Rolling bearings TC 4 meets GPS TC 213* [Em linha]. Evolution – Business and Technology Magazine from SKF. Stockholm: SKF. 2012, 3, p. 24-28. [Consult. 3 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://evolution.skf.com/wp-content/uploads/2012/06/Rolling\\_bearings\\_TC\\_4\\_meets\\_GPS\\_TC\\_2013.pdf](http://evolution.skf.com/wp-content/uploads/2012/06/Rolling_bearings_TC_4_meets_GPS_TC_2013.pdf)>.

### 6.8.1 Normalização

- |                        |   |
|------------------------|---|
| ASME-B4.1:1967 (R2009) | – Preferred Limits and Fits for Cylindrical Parts. ASME.  |
| ASME Y14.5:2009        | – Dimensioning and tolerancing. ASME.   |
| DIN 7167:1987          | – Relationship between tolerances of size, form, and parallelism; envelope requirement without individual indication on the drawing. DIN (anulada em 2010, com a entrada em vigor da DIN EN ISO 14405-1). |
| DIN 7190:2001          | – Interference fits – Calculation and design rules. DIN.  |
| EN 10278:1999          | – Dimensions and tolerances of bright steel products. EN.   |



ISO 1:2002	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Standard reference temperature for geometrical product specification and verification. ISO.
ISO 129-1:2004	– Technical drawings – Indication of dimensions and tolerances – Part 1: General principles. ISO.
ISO/DIS 129-1.2:2012	– Technical drawings – Indication of dimensions and tolerances – Part 1: General principles. ISO.
ISO 273:1979	– Fasteners – Clearance holes for bolts and screws. ISO.
ISO 286-1:2010+Cor.1:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. ISO.
ISO 286-2:2010+Cor.1:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts. ISO.
ISO 286-1:1988	– ISO system of limits and fits – Part 1: Bases of tolerances, deviations and fits. ISO (anulada em 2010).
ISO 406:1987	– Technical drawings – Tolerancing of linear and angular dimensions. ISO (anulada em 2000).
ISO 492:2014	– Rolling bearings – Radial bearings – Dimensional and geometrical tolerances. ISO.
ISO 1101:2012+Cor.1:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
ISO 1132-1:2000	– Rolling bearings – Tolerances – Part 1: Terms and definitions. ISO.
ISO 1302:2002	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation. ISO.
ISO 1829:1975	– Selection of tolerance zones for general purposes. ISO (anulada em 2010).
ISO 1938-1:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional measuring equipment – Part 1: Plain limit gauges of linear size. ISO.
ISO 2538-2:2014	– Geometrical product specifications (GPS) – Wedges -- Part 2: Dimensioning and tolerancing. ISO.
ISO 2768-1:1989	– General tolerances – Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications. ISO.
ISO 3040:2016	– Geometrical product specifications (GPS) -- Dimensioning and tolerancing – Cones. ISO.
ISO 3040:2009	– Geometrical product specifications (GPS) -- Dimensioning and tolerancing – Cones. ISO (anulada em 2016).
ISO 4759-1:2000	– Tolerances for fasteners – Part 1: Bolts, screws, studs and nuts – Product grades A, B and C. ISO.
ISO 5458:1998	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Positional tolerancing. ISO.
ISO 5459:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum-systems. ISO.
ISO 8015:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals – Concepts, principles and rules. ISO.
ISO 8015:1985	– Technical drawings – Fundamental tolerancing principle. ISO (anulada em 2011).

ISO 10579:2010 + Cor 1:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensioning and tolerancing – Non-rigid parts. ISO.
ISO 14405-1:2016	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 1: Linear sizes. ISO.
ISO/DIS 14405-1.2:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 1: Linear sizes. ISO.
ISO 14405-2:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Dimensions other than linear sizes. ISO.
ISO/DIS 14405-2.2:2010	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Dimensions other than linear sizes. ISO.
ISO/FDIS 14405-3:2016	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 3: Angular sizes. ISO.
ISO/TR 16570:2004	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Linear and angular dimensioning and tolerancing: +/- limit specifications – Step dimensions, distances, angular sizes and radii. ISO (anulado em 2009).
ISO 14660-2:1999	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical features – Part 2: Extracted median line of a cylinder and cone, extracted median surface, local size of an extracted feature. ISO (anulada e substituída pela ISO 17450-3:2016).
ISO 17450-1:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 1: Model for geometrical specification and verification. ISO.
ISO 17450-3:2016	– Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 3: Toleranced features. ISO.
ISO 22432:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Features utilized in specification and verification. ISO.
NF E 02-200:1994	– Vérification des tolérances de pièces lisses – Calibres à limites – Généralités, définitions, vérifications, utilisation. AFNOR.
NP 107:1962	– Tolerâncias e ajustamentos. Terminologia. IPQ.
NP 189:1962	– Sistema de tolerâncias. Noções fundamentais. IPQ.
NP 190:1962	– Sistema de tolerâncias. Simbologia. IPQ.
NP 257:1961	– Sistema de tolerâncias. Ajustamentos recomendados. IPQ (anulada em 1993).
NP 258:1961	– Sistema de tolerâncias. Folgas e apertos de ajustamentos recomendados. IPQ (anulada em 1993).
NP 406:1966	– Desenho técnico. Inscrição de tolerâncias lineares e angulares. IPQ (anulada em 1993).
NP I 1040:1970	– Sistema de tolerâncias. Veios e furos usuais. Desvios. IPQ (nunca publicada como norma).
NP EN 45020:2009	– Normalização e actividades correlacionadas. Vocabulário geral (Guia ISO/IEC 2:2004).
STD 5061,101:1994	– ISO tolerances. VOLVO (not for new design).

# **CAPÍTULO 7**

## **Tolerâncias geométricas**



## Capítulo 7

### Tolerâncias geométricas

#### 7.1 Introdução

Até às primeiras décadas do século XX, conforme foi já referido no capítulo anterior, as capacidades das máquinas-ferramenta eram tais que se tornava relativamente fácil produzir peças que podiam ser consideradas “geometricamente perfeitas”, quando se comparavam as suas características geométricas com as correspondentes magnitudes das tolerâncias de trabalho a que estavam sujeitas as suas dimensões inscritas nos desenhos. Por volta da II Guerra mundial, a indústria de defesa do Reino Unido e as indústrias de defesa e automóvel dos USA começaram a sentir a necessidade de definir novas linguagens gráficas que permitissem descrever melhor as características geométricas, necessárias ao cumprimento de diferentes requisitos funcionais dos produtos [N2, N3].

Na Grã-Bretanha, a produção da indústria de defesa começou a ser seriamente afetada pela ocorrência de elevadas taxas de rejeição de peças que não possuíam as características que lhes permitissem ser montadas corretamente nos seus respetivos sistemas. Os britânicos verificaram que esse problema era causado pelas limitações inerentes à utilização de sistemas de coordenadas com tolerâncias  $\pm e$ , com efeitos ainda mais críticos, pela ausência de informação integral e completa nos desenhos de engenharia.

Movidos pelas necessidades impostas pela guerra, os britânicos desenvolveram e normalizaram novos conceitos. No período de 1938/40, Stanley Parker, da “*Royal Torpedo Factory*”, em Alexandria, na Escócia, realizou experiências com peças de torpedos e demonstrou que as zonas de tolerância de localização nas montagens deveriam ser cilíndricas (com posições teoricamente exatas) e não paralelepípedicas, tendo, para esse efeito, concebido um novo sistema de toleranciamento geométrico de localização, que permitiu aumentar os níveis de aceitação das peças produzidas, ver exemplo na figura 7.1. Deste trabalho resultou a publicação do relatório “*Notes on Design and Inspection of Mass Production Engineering Work*”, em 1940.

Os britânicos começaram por publicar, em 1944, um conjunto de dois manuais intitulados “*Data Sheets for Designers and Draughtsmen*” e, em 1948, acabaram por editar o manual “*Dimensional Analysis of Engineering Designs*”. Esta foi o primeiro documento completo que utilizava os conceitos fundamentais do “**toleranciamento geométrico de localização com a utilização de dimensões teoricamente exatas**” (ver secção 7.6) [K1, S3].

Por sua vez, nos USA, a Chevrolet já tinha publicado, em 1940, "*The Draftsman's Handbook*", o primeiro documento com uma análise significativa sobre tolerâncias de localização e onde foi introduzida a "condição de máximo de matéria" (MMC – "*maximum material condition*"), ver secção 8.3. Em 1941, o manual "*Aircraft Engine Drafting Room Practice*", da SAE – "*American Society of Automotive Engineers*", introduziu uma forma elementar de **cotagem de localização com dimensões teoricamente exatas** ("*true position dimensioning*") [G1, G2, K1].

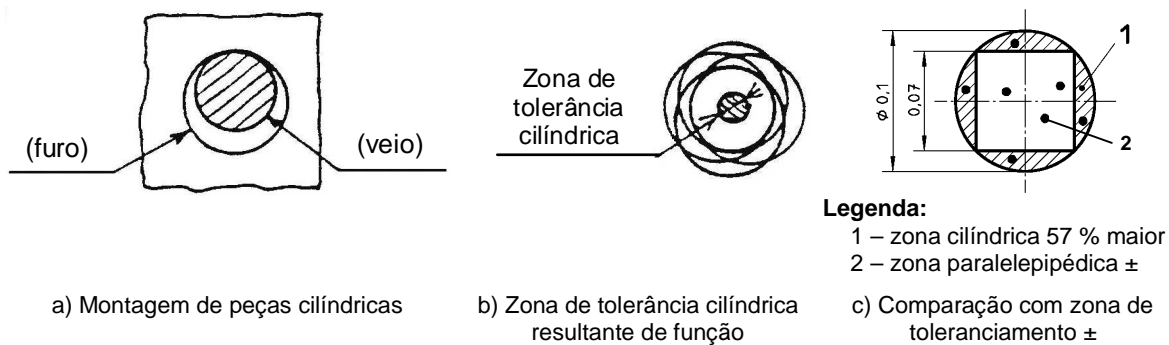


Figura 7.1 – Comparação de zonas de tolerância de localização em elementos de tamanho cilíndricos

Em 1946, o Exército americano editou o U.S. Army Ordnance Corps ORD 30-1-7 – "*Standard for Dimensioning and Tolerancing*" [M3], um documento com força legal sobre a cotagem e toleranciamento que introduziu a utilização de **símbolos** (em vez de anotações) para a **especificação de tolerâncias geométricas de orientação** (paralelismo e perpendicularidade) e de **posição** (coaxialidade e simetria).

No entanto, em termos de normas nacionais, a 2ª edição da norma americana ASA Z 14.1 – "*Drawings and Drafting Room Practice*", publicada em 1946, pela "*American Standards Association*", continuava a fazer apenas uma referência mínima ao toleranciamento. Nesse mesmo ano, a SAE divulgou as práticas de cotagem aplicadas na indústria aeronáutica, através do seu "*SAE Aeronautical Drafting Manual*", acabando depois por editar, em 1952, uma versão desta norma para a indústria automóvel.

Em 1949, o Exército americano seguiu a orientação do britânico com a publicação da primeira norma militar sobre cotagem e toleranciamento, conhecida como MIL-STD-8. A nova versão desta norma, publicada em 1953, a MIL-STD-8A, estabeleceu a utilização de **sete símbolos gráficos de base para tolerâncias geométricas (retitude, planeza, paralelismo, perpendicularidade, inclinação, localização e coaxialidade)** e introduziu uma metodologia para a cotagem funcional.

Este processo de desenvolvimento de conceitos deu origem à existência de três grupos diferentes de normas sobre desenhos, publicadas nos USA: as normas ASA, as SAE e as militares (MIL). Esta situação, que ainda durou alguns anos, gerou alguma confusão derivada das inconsistências verificadas entre essas normas, mas contribuiu para um progresso lento, mas mensurável, com vista à união dos diferentes documentos normativos.

Em 1957, a ASA (em coordenação com os ingleses e os canadianos) aprovou a ASA Y14.5 – “*American Drawing Standard for Dimensioning and Notes*”, a primeira norma americana dedicada à cotação e toleranciamento, com 35 páginas, mas sem símbolos ou indicações de tolerâncias, porque se considerou ser prematura a sua introdução, pois, à época, pensava-se que a indústria não se iria habituar aos novos métodos de toleranciamento [B1]. Nesses tempos, as normas alemãs DIN 7182-4:1959 e DIN 406:1968 também continuavam a especificar os desvios geométricos admissíveis recorrendo, fundamentalmente, a anotações inscritas nos desenhos, conforme documentam os exemplos apresentados na figura 7.2, relativos a tolerâncias de forma e de posição [H1].

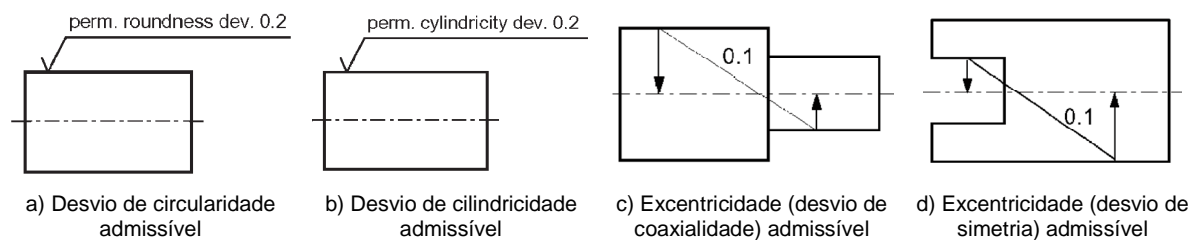
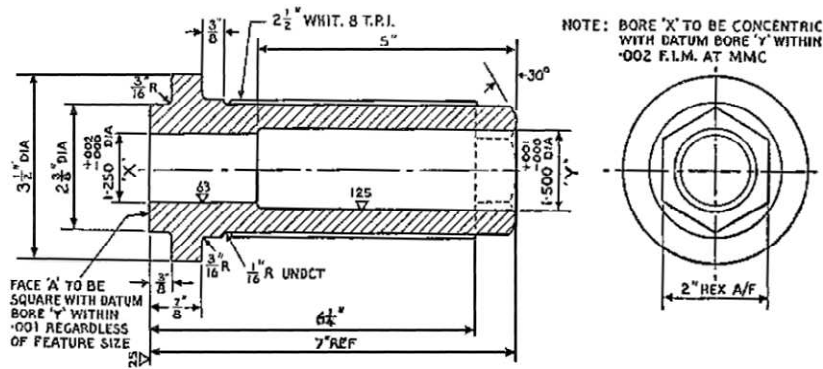


Figura 7.2 – Exemplos de indicações de desvios geométricos admissíveis, em desenhos de engenharia, de acordo com normas DIN. Adaptada de [H1]

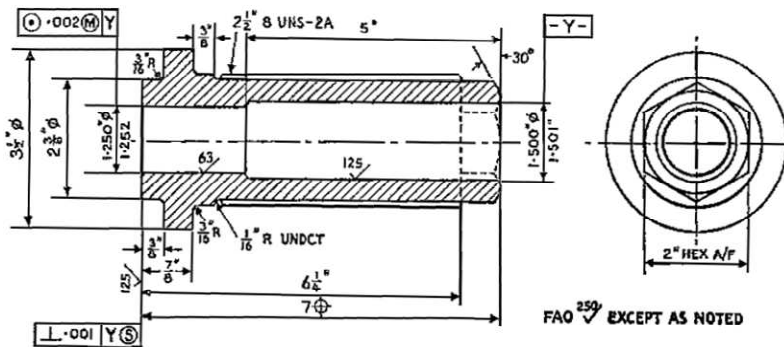
A norma americana MIL-STD-8B-1959 veio aproximar as normas militares das normas ASA e SAE, aceitando uma utilização alargada de símbolos. Introduziu também os conceitos de **sistema de referências especificadas definidas por 3 planos** e de limites de tamanho, mas acabou por não ser aprovada como norma de desenho, no âmbito da indústria americana, [G1, G2, K1]. No entanto, o Canadá avançou com este trabalho e, em 1959, editou a primeira norma nacional com símbolos para tolerâncias geométricas e de posição, em particular, para desenhos de engenharia. A figura 7.3 b) mostrava um exemplo da possível evolução do desenho representado na figura 7.3 a), com uma futura utilização generalizada dos símbolos então em vigor [B1].

Aquando da publicação da referida nova norma canadiana de desenho, em 1959, George Noble [N4], citado por Booker [B1], afirmava que “...o objetivo de uma simbologia ... é o estabelecimento de uma utilização mundial do mínimo de símbolos simples, definidos e ideográficos, com vista a assegurar que os requisitos de conceção são claramente evidentes para o leitor, sem recurso a qualquer interpretação, linguística ou de outro tipo. A introdução do sistema de símbolos ... adapta-se à tendência moderna para uma prática de desenho funcional ou simplificada e representa um desenvolvimento lógico dos símbolos de desenho incluídos em muitas normas, em anos recentes, tais como, por exemplo, símbolos de soldadura, para roscas, para estados de superfície, etc. ... Este passo novo e fundamental, em direção à unificação, leva-nos ainda mais próximo do objetivo do movimento ABC (“*America, Britain, Canada*”, ver referência a esta organização na secção 6.1 deste texto). Este objetivo pode ser definido simplesmente como – a produção de desenhos de engenharia que comunicam os requisitos de conceção completos para a intermutabilidade da fabricação em qualquer país, independentemente das línguas ou costumes desse país ou do país de origem. Se, após terem terminado por completo todas as comunicações com o gabinete de origem, um desenho

puder ser interpretado e as peças intermutáveis forem corretamente fabricadas, então ter-se-á atingido o objetivo do programa estabelecido para a Unificação das Normas.”



a) Desenho em 1956, de acordo com a norma canadiana então em vigor



b) Desenho refeito com símbolos de tolerâncias geométricas da norma canadiana então em vigor, em 1959

Figura 7.3 – Exemplo da evolução da indicação de tolerâncias nos desenhos de engenharia. Adaptada de [B1]

Em 1963, a norma americana MIL-STD-8C expandiu o conceito de cotagem de localização com dimensões teoricamente exatas (“*true position*”) e introduziu o **conceito de zonas de tolerância projetadas** (“*projected tolerance zones*”). Em 1966, a ASA passou a denominar-se USASI – “*United States of America Standards Institute*” e editou a norma USASI Y14.5 que introduziu os **símbolos para as tolerâncias geométricas de cilindridade, perfil e batimento** e mudou as definições de retitude e concentricidade. Esta norma foi a primeira norma unificada e aceite como norma americana de “cotagem e toleranciamento”.

Por outro lado, em termos internacionais, o primeiro documento normativo publicado pela ISO, neste domínio, foi a recomendação ISO/R 1101-1:1969 – “*Tolerances of form and of position: Generalities, symbols, indications on drawings*”, que serviu de base a várias normas europeias editadas na década de 70, tais como a norma francesa NF E 04-121:1970, que resultou de uma revisão da anterior edição de 1966 e acabou substituída pela NF E 04-552:1978, e a DIN 7184-1:1972 com referências complementares à condição de máximo de matéria.

Como complemento da ISO/R 1101-1, a ISO publicou também a recomendação ISO/R 1660:1971 sobre a “Cotagem e o toleranciamento geométrico de perfis” (“linhas de contorno perfiladas”). As



edições seguintes deste documento, as normas ISO 1660 de 1982 (1ª ed.) e 1987 (2ª ed.), estenderam o campo de aplicação às “superfícies perfiladas”.

Em 1973, o USASI passou a denominar-se ANSI – “*American National Standards Institute*” e editou a norma ANSI Y14.5 que incorporou toda a simbologia existente, substituindo as anotações relativas a tolerâncias geométricas por símbolos, estabeleceu uma classificação de tolerâncias, introduziu o toleranciamento de localização composto, a “condição de mínimo de matéria” (LMC – “*least material condition*”, ver secção 8.4) e as **referências parciais** (“*datum targets*”).

Em 1982, a norma ANSI Y14.5 passou a designar-se por ANSI Y14.5M e sofreu uma nova revisão, com a incorporação de nova simbologia, nomeadamente para a **tolerância geométrica de batimento total**, da especificação de uma tolerância geométrica zero na condição de máximo de matéria (ver secção 8.3.2 deste texto) e de disposições relativas à cotação para CAD/CAM. As referências [G1] e [G2] contêm um quadro que resume a evolução da simbologia relativa às tolerâncias geométricas, nos USA, ao longo do período 1945-1982.

Na década de 80, a nível internacional (ISO), merecem destaque a publicação das seguintes normas: a ISO 5459:1981 (1ª ed.), sobre “Referências especificadas e sistemas de referências especificadas para o toleranciamento geométrico”; a ISO 1101:1983 (1ª ed.) – “*Technical drawings – Geometrical tolerancing – Tolerancing of form, orientation, location and run-out – Generalities, definitions, symbols, indications on drawings*”, a norma de base que trata dos princípios da simbologia e da indicação de tolerâncias geométricas nos desenhos e estabelece as definições geométricas apropriadas; o ISO/TR 5460:1985, com as “Orientações sobre princípios e métodos de verificação de tolerâncias geométricas”, e a ISO 5458:1987 (1ª ed.), sobre “Tolerâncias de localização para o toleranciamento geométrico”, para além da já atrás referida ISO 1660:1987. Este grupo de normas assentava, fundamentalmente, em conceitos relativos a uma metrologia convencional, baseada em instrumentos de medição (“*hard gauging*”) e a maioria esteve em vigor durante grande parte da primeira década do século XXI.

Em 1985, com a edição da norma ISO 8015, que passou a especificar o “princípio de independência” como princípio fundamental de toleranciamento, sempre que, no interior ou junto da legenda do desenho, estivesse inscrita a indicação “**Toleranciamento ISO 8015**”, o toleranciamento geométrico viu ainda mais reforçada a sua importância, sobretudo ao nível da especificação geométrica de elementos de tamanho (“*features of size*”). Com este princípio, um tamanho linear toleranciado passou a ser verificado apenas como uma dimensão local entre dois pontos do elemento de tamanho, deixando de haver lugar a qualquer controlo simultâneo e implícito dos seus desvios geométricos de forma e de orientação.

Assim, por exemplo, o elemento “superfície cilíndrica” da ponta de veio, representado na figura 7.4 a), pode ser produzido entre os diâmetros limites correspondentes a  $\varnothing 25\text{ h}8$  (IT8 = 0,033 mm). Os

diâmetros locais reais, avaliados em qualquer secção reta da ponta do veio, devem, pois, apresentar valores entre  $d_{\max} = 25,000 \text{ mm}$  e  $d_{\min} = 24,967 \text{ mm}$  [ver figura 7.4 b)].

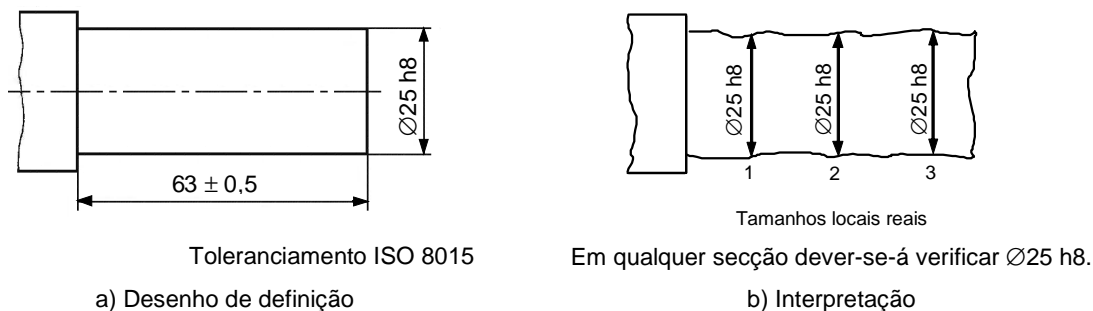


Figura 7.4 – Exemplo de especificação da ponta de um veio em conformidade com o princípio de independência

Neste contexto, os desvios geométricos passaram a ter de ser limitados através de uma especificação direta de tolerâncias geométricas ou da inscrição do “requisito de envolvente” **E** (anteriormente designado de “Princípio de Taylor”) junto do tamanho toleranciado. A opção pelo “princípio de independência” como princípio fundamental de toleranciamento, por parte da ISO, é uma das principais divergências face aos atuais procedimentos da ASME Y14.5 que continua a especificar que os limites das dimensões “tamanhos” devem ser verificados através de meios que emulem o requisito de envolvente (*Rule #1*).

Na década de 80, a utilização industrial de máquinas de medição de coordenadas (CMMs – “*coordinate measuring machines*”), no controlo de produção das peças, teve um grande incremento, mas cedo se começou a verificar que os algoritmos numéricos residentes nas CMMs forneciam resultados diferentes dos obtidos através da metrologia convencional (calibres, instrumentos convencionais de medição manual entre “dois pontos”, etc.). Esta divergência despoletou uma “crise metrológica” que começou a ser efetivamente abordada e solucionada na década seguinte com o desenvolvimento de trabalhos com vista à racionalização e matematização dos toleranciamentos e da metrologia [F2, V1].

Por sua vez, o desenvolvimento registado nos processos de fabricação tem permitido melhorar, significativamente, a qualidade dimensional dos produtos, de modo que os desvios geométricos resultantes podem mesmo apresentar valores relativamente maiores do que os desvios dimensionais, sendo essa diferença maior do que a verificada anteriormente. Por isso, os desvios geométricos de forma (retitude, planeza, circularidade, cilindridade, etc.) passaram a ter de ser limitados num grau maior do que no passado, por meio de tolerâncias, de modo a garantir-se uma correta função da peça e a relevância da cotação e toleranciamento dimensionais, [B3].

Está-se também a chegar a uma fase em que os valores das tolerâncias dimensionais e geométricas de forma, passíveis de serem especificados, estão a atingir uma magnitude tão pequena que a influência do estado de superfície (rugosidade), na sua avaliação, passa a ser significativa. Neste contexto, o toleranciamento geométrico de forma realizado de modo tradicional, baseado em zonas

de tolerância simples, torna-se inadequado, uma vez que o projetista fica impossibilitado de indicar, na especificação geométrica inscrita na definição do produto, até que ponto é que as características do estado de superfície (ondulação e rugosidade) deverão ser consideradas ou ignoradas na verificação de tolerâncias geométricas de forma [B3, N2 e N3].

A definição de requisitos geométricos, através de zonas de tolerância simples, funciona bem para caracterizar a função de ajustamento que assegura a capacidade de montagem das peças, mas é menos adequada para a caracterização de outros requisitos funcionais, importantes na indústria moderna, tais como a resistência ao desgaste, a eliminação de fugas de fluidos e da ocorrência de gripagem em regime dinâmico, o comportamento a pressão elevada, as vedações metal-metal, a limitação de ruído em rolamentos, etc. [N2].

Em 1994, a norma ANSI Y14.5M foi revista e passou a ser designada por ASME Y14.5M, tendo adotado a sigla da associação responsável pelo acompanhamento deste documento normativo, a ASME – “*American Society of Mechanical Engineers*”. Com o maior empenhamento dos peritos americanos nos trabalhos de normalização dos domínios dos “Desenhos técnicos” e da “Especificação geométrica de produtos”, no âmbito da ISO, nesta edição deram-se passos significativos com vista à resolução de diferenças antigas registadas entre as práticas da ISO e da Y14.5, nestes domínios. Simultaneamente, com a identificação da necessidade de se proceder a uma definição matemática das normas de toleranciamento correntes – a matematização das tolerâncias – de modo a dar um rigor matemático à norma ASME Y14.5, foi elaborada a norma ASME Y14.5.1M-1994 de modo a criar definições explícitas para a sua utilização em áreas tais como CAD e CAM.

A criação do **Comité técnico ISO/TC 213** “Especificações e verificação dimensionais e geométricas de produtos”, em 1996, contribuiu decididamente para o estabelecimento das bases para uma nova linguagem GPS que permite definir uma especificação geométrica como um conjunto ordenado de operações (designado de **operador**) que pode ser considerado como uma instrução virtual de medição, em que cada operação e os seus parâmetros definidores são passos do processo de medição [N2].

Em 2009, a norma ASME Y14.5M sofreu uma nova revisão periódica e a sua designação foi alterada para ASME Y14.5-2009. Com a crescente globalização de muitas das maiores indústrias, neste documento, chama-se a atenção para a importância da conceção estabelecer os requisitos funcionais com uma maior exatidão. Nesse sentido, considera-se importante a utilização crescente da “*Geometric dimensioning and tolerancing*” (GD&T), deixando o toleranciamento dimensional reservado sobretudo para as dimensões “tamanho” em elementos de tamanho. Nesta última versão da norma, pretende-se que os utilizadores comecem por estabelecer as referências especificadas baseados na função da peça, de modo a permitir a restrição dos graus de liberdade necessária para a fabricação e verificação da peça.

Paralelamente, a norma ISO 1101 foi objeto de revisões em 2004 (2ª ed.) e 2012 (3ª ed.) com vista, nomeadamente, à sua adaptação à nova linguagem GPS, permitindo também estender a

interpretação das especificações inscritas nos desenhos 2D (com um significado teoricamente exato) às peças reais, e possibilitando a sua utilização simultânea em anotações realizadas em modelos virtuais 3D, sobretudo quando o plano de projeção está implicado no significado das anotações 2D.

Por sua vez, a norma ISO 5459 sofreu também uma revisão profunda, em 2011 (2ª ed.), de modo a permitir a definição do operador de especificação utilizado para o estabelecimento de referências especificadas e sistemas de referências especificadas. A anterior edição desta norma lidava apenas com referências especificadas formadas a partir de elementos associados (“elementos de referência simulada”) constituídos por planos, cilindros e esferas, com base no “requisito da oscilação mínima” (“*minimum rock requirement*”) [H1], também designado de “oscilação equilibrada” (“*equalized rock*”, ver ISO/CD 5459-3.2), num contexto de metrologia convencional, ver Figura 7.5. A presente versão da norma lida com superfícies de todas as classes de invariância, que são cada vez mais utilizadas ao nível da indústria, e recorre a diferentes métodos de associação utilizados num contexto de metrologia digital computadorizada.

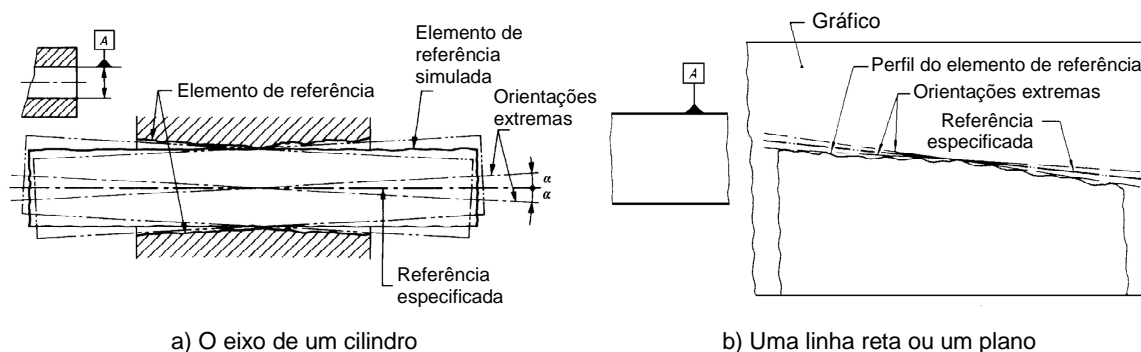


Figura 7.5 – Exemplos de referências especificadas estabelecidas com base no “requisito da oscilação mínima”. Adaptada da ISO 5459:1981 e do ISO/TR 5460

Atualmente, as normas ISO 1101, ISO 5459, ISO 1660 e ISO 5458 estão novamente em fase de revisão. Pretende-se que as novas versões destas normas possam vir a possibilitar, nomeadamente:

- uma aplicação mais rigorosa do “princípio de independência”, na documentação técnica de produtos;
- a indicação de operadores (conjuntos ordenados de operações) de especificação especiais para as tolerâncias geométricas (de forma, de orientação, de posição) e para as referências especificadas e sistemas de referências especificadas, contemplando a possibilidade da inclusão de operações de filtragem e de associação, com vista a reduzir a correspondente ambiguidade (incerteza) da especificação;
- a indicação de elementos geométricos auxiliares de modo a permitir estender, às peças reais, geometricamente imperfeitas, a interpretação de determinadas especificações inscritas nos desenhos 2D em representação ortográfica (com um significado teoricamente exato) e possibilitando a sua utilização simultânea em anotações realizadas em vistas axonométricas 3D, elaboradas em desenhos 2D, e em modelos virtuais 3D.

## 7.2 Breve referência às propriedades macrogeométricas das superfícies

A aptidão funcional de uma peça para um dado fim depende das suas propriedades internas (propriedades da matéria, descontinuidades e imperfeições internas) e das condições da sua superfície que, por sua vez, englobam as respetivas propriedades químicas, mecânicas e geométricas. As propriedades da camada superficial poderão ser diferentes das propriedades da zona do núcleo.

As propriedades geométricas são definidas através de desvios em relação aos elementos geométricos ideais constituintes do modelo nominal da peça (ver secção 4.3 deste texto). Os elementos geométricos ideais, que são partes da superfície completa do modelo nominal e possuem uma forma geométrica única (p. ex. planos, cilindros, esferas, cones, toros, etc.), denominam-se de **elementos integrais**. Os elementos que resultam destes, tais como planos de simetria, eixos, centros, etc., designam-se de **elementos derivados** [H1].

Os desvios macrogeométricos observados nas peças mecânicas (reais) podem resultar de um efeito combinado de fatores de influência diversos, dentre os quais, alguns dos mais significativos estão agrupados no quadro 7.1.

Quadro 7.1 – Fatores de influência dos desvios geométricos [H1]

Fatores de influência	Exemplos de influências
<b>Matéria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– rigidez da peça (configuração);</li> <li>– matéria;</li> <li>– tensões internas da matéria.</li> </ul>
<b>Máquina (ferramenta)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– exatidão da máquina-ferramenta, qualidade dos sistemas de guiamento;</li> <li>– rigidez estática e dinâmica da máquina-ferramenta;</li> <li>– propriedades térmicas da máquina-ferramenta;</li> <li>– manutenção;</li> <li>– meio ambiente (p. ex. vibrações).</li> </ul>
<b>Método</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ferramenta;</li> <li>– bucha, fixação, método de aperto;</li> <li>– parâmetros de trabalho (p. ex. velocidade de corte, profundidade de corte, força de corte, refrigeração);</li> </ul>
<b>Medição</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– desvios de medição sistemáticos incorretos;</li> <li>– desvios de medição aleatórios;</li> </ul>
<b>Fabricante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– formação, competência, exatidão de reaperto;</li> <li>– meio ambiente (p. ex. temperatura, etc.).</li> </ul>

As máquinas-ferramenta são classificadas de acordo com as suas capacidades. Por sua vez, as propriedades relacionadas com a matéria e a forma da peça e com os parâmetros de trabalho (p. ex. velocidade de corte, profundidade de corte e método de aperto) devem ser registadas no âmbito do planeamento da produção.

Os **desvios geométricos** dos objetos (reais) produzidos podem ser classificados em:

- **desvios de forma:** desvios que dizem respeito a elementos geométricos isolados, tais como desvios de retitude, de circularidade, de planeza, etc.;
- **desvios de orientação e de posição:** desvios que dizem respeito a elementos geométricos associados, tais como, desvios de paralelismo, de perpendicularidade, de localização, de simetria, etc.;
- **desvios de batimento:** desvios globais e compostos verificados durante a rotação de um elemento geométrico em torno de um eixo de referência.

Para além da sua influência no comportamento em funcionamento das superfícies conjugadas de peças acopladas, um controlo adequado dos desvios macro e microgeométricos é muito importante para outros requisitos funcionais relevantes na indústria moderna, tais como a resistência ao desgaste, a eliminação de fugas e gripagem em termos dinâmicos, as altas pressões, as vedações metal-metal, a limitação de ruído em rolamentos, etc. [N2].

A título de exemplo, na figura 7.6, indicam-se alguns casos típicos de desvios de circularidade de secções retas de veios, de causas que estão na sua origem, tais como o aperto da peça na bucha e a força de corte, e da variação característica deste tipo de desvios em função da velocidade de corte por arranque de aparas.

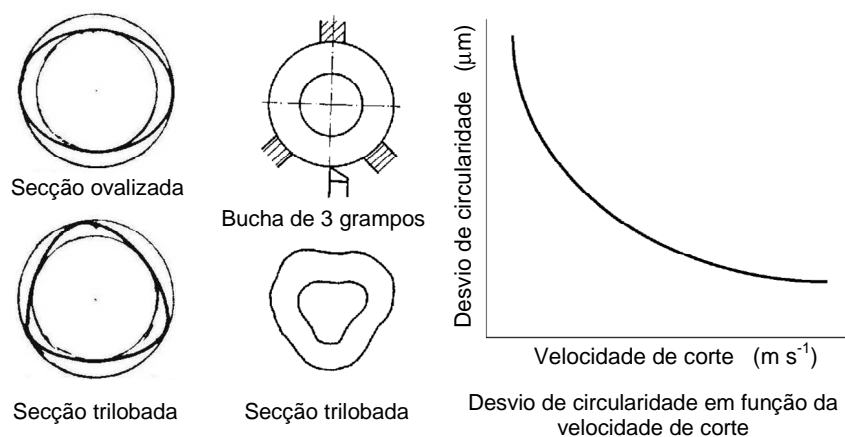


Figura 7.6 – Exemplos de desvios de circularidade de secções retas e causas que estão na sua origem

Entre as causas principais da ocorrência dos desvios de circularidade podem destacar-se uma má fixação da peça e/ou da ferramenta de corte. Em casos particulares de fabricação (p. ex. em processos de retificação sem centros ou no aperto de veios em buchas universais de 3 grampos), deve haver um controlo adequado do processo para se evitar o aparecimento de secções com configurações trilobadas. Por sua vez, na figura 7.7, podem observar-se alguns dos desvios geométricos longitudinais (das linhas geratrizes) resultantes de operações de torneamento cilíndrico.

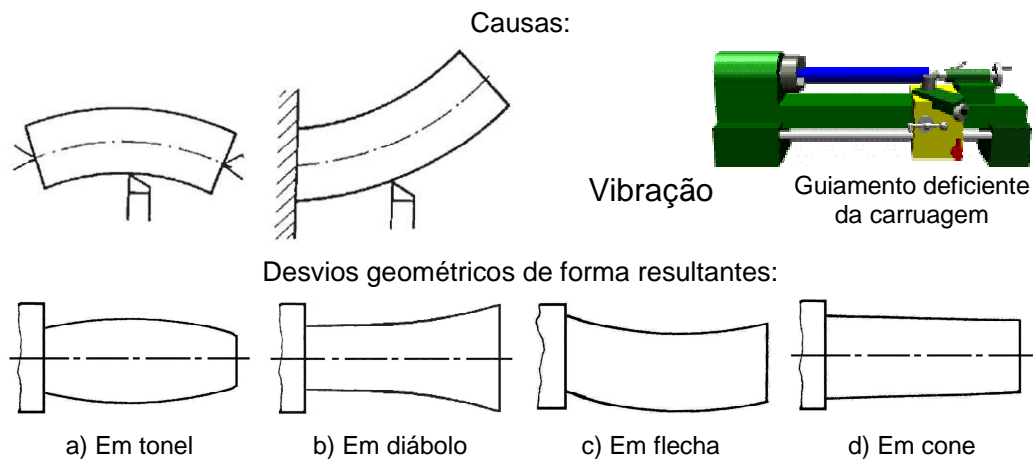


Figura 7.7 – Exemplos de desvios de retitude das geratrizes e de cilindricidade da ponta de veio e causas que estão na sua origem

Estes desvios dependem da forma e da rigidez da peça, da pressão de corte excessiva exercida pela ferramenta, de um apoio deficiente da peça, da qualidade da máquina-ferramenta, etc. Os desvios geométricos de forma transversais (das secções retas) ou longitudinais (das linhas geratrizes) podem ser incompatíveis com a montagem e o funcionamento de uma ponta de veio.

Os maiores desvios geométricos registados nas superfícies de peças sujeitas a operações de corte por arranque de apra derivam, normalmente, das peças terem sido submetidas a mais do que uma operação de aperto (reaperto) durante o seu processo de fabricação, pelo que este tipo de operações deverá ser executado com um cuidado especial. Sempre que possível, os elementos toleranciados e os elementos de referência relacionados através de tolerâncias de orientação e de posição deverão ser fabricados sem necessidade de alterar o aperto da peça na máquina [H1].

## 7.3 Conceitos de base sobre o toleranciamento geométrico

### 7.3.1 Generalidades

A norma ISO 1101 dispõe de informações de base e especifica requisitos para o toleranciamento geométrico de peças. Constitui o ponto de partida e estabelece os fundamentos para este tipo de toleranciamento. Como tal, fornece os princípios de representação e de indicação, nos desenhos técnicos, das **tolerâncias de forma, de orientação, de posição e de batimento**, fixando as definições geométricas necessárias. O termo "**tolerâncias geométricas**" é utilizado como termo genérico englobando todas estas tolerâncias. Outras normas, referidas na secção 7.13.1, fornecem informações mais detalhadas sobre o toleranciamento geométrico.

A ISO 1101 estabelece regras para indicações explícitas e diretas de especificações geométricas. Por sua vez, a norma ISO 16792 apresenta uma alternativa para as indicações indiretas, contemplando as possibilidades da ligação de especificações a modelos em CAD 3D. Deste modo, diferentes

componentes da especificação poderão ficar disponíveis, através de uma função de consulta ou de outra interrogação de dados no modelo, em vez de serem indicados por meio de anotações visíveis, mas no entanto sem a possibilidade de modificação da especificação geométrica.

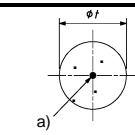
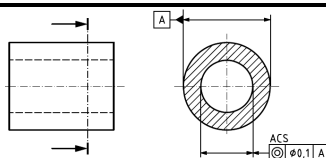
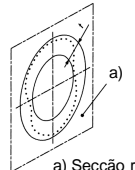
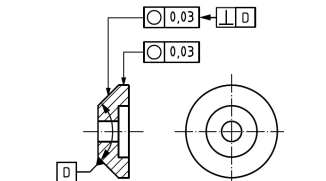
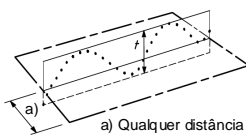
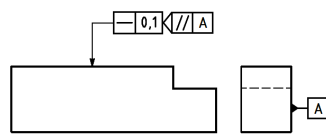
De acordo com a norma ISO 1101, **as tolerâncias geométricas devem ser especificadas em conformidade com os requisitos funcionais**. No entanto, os requisitos de fabricação e de controle podem, também, ter influência sobre o toleranciamento geométrico. A indicação de tolerâncias geométricas não implica, necessariamente, a utilização de um método particular de fabricação, de medição ou de verificação.

Uma **tolerância geométrica** aplicada a um elemento define a **zona de tolerância**, no interior da qual deve estar contido esse elemento. Um **elemento** (geométrico) é uma porção específica de uma peça, tal como, por exemplo, um ponto, uma linha ou uma superfície. Esses elementos podem ser elementos integrais (p. ex. a superfície externa de um cilindro) ou derivados (por exemplo, uma linha mediana ou uma superfície mediana).

No âmbito da ISO 1101, os termos “**eixo**” e “**plano mediano**” são utilizados para elementos derivados de forma perfeita, e os termos “**linha mediana**” e “**superfície mediana**” são utilizados para elementos derivados de forma imperfeita.

A **zona de tolerância** é o espaço limitado por uma ou várias linhas ou superfícies geometricamente perfeitas e caracterizado por meio de uma dimensão linear denominada de **tolerância**.

De acordo com a característica geométrica a toleranciar e o modo como esta está cotada, a **zona de tolerância** pode assumir uma das seguintes configurações, indicadas na figura 7.8.

Zonas de tolerância	Tolerância $t$	Exemplos de aplicação
– o espaço no interior de um círculo;	 a) Ponto de referência A	
– o espaço entre duas circunferências concêntricas;	 a) Seção reta qualquer	
– o espaço entre duas linhas complexas equidistantes ou duas linhas retas paralelas;	 a) Qualquer distância	

(continua)

Figura 7.8 – Exemplos de zonas de tolerância definidas por toleranciamento geométrico. Adaptada da ISO 1101



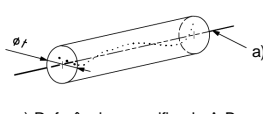
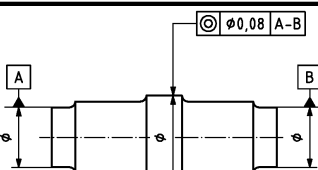
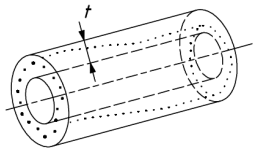
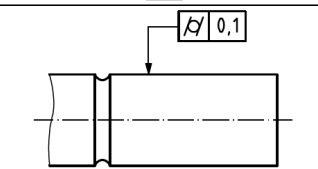
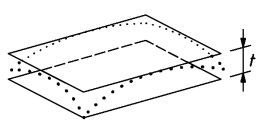
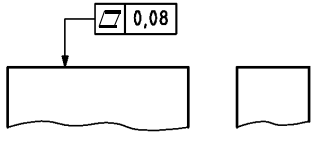
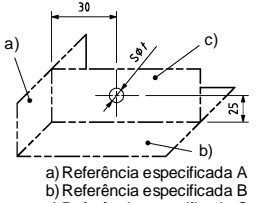
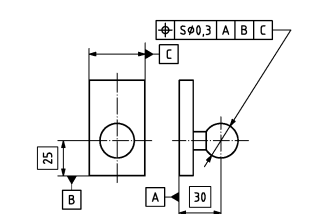
Zonas de tolerância	Tolerância $t$	Exemplos de aplicação
– o espaço no interior de um cilindro;	 a) Referência especificada A-B	
– o espaço entre dois cilindros coaxiais;		
– o espaço entre duas superfícies complexas equidistantes ou dois planos paralelos;		
– o espaço no interior de uma esfera.	 a) Referência especificada A b) Referência especificada B c) Referência especificada C	

Figura 7.8 – Exemplos de zonas de tolerância definidas por toleranciamento geométrico. Adaptada da ISO 1101 (conclusão)

A menos que seja requerida uma indicação mais restritiva, expressa, por exemplo, através de uma nota explicativa, a forma ou a orientação do elemento tolerenciado poderá ser qualquer, no interior dessa zona de tolerância. Também, salvo indicação em contrário, especificada de acordo com a figura 7.24 e as secções 7.5.1.2, 7.5.1.3 e 7.7 deste texto, a tolerância aplica-se a toda a extensão do elemento considerado.

As tolerâncias geométricas atribuídas a elementos correlacionados com uma referência especificada não limitam os desvios de forma do próprio elemento de referência. Deste modo, poderá ser necessário especificar tolerâncias de forma para o(s) elemento(s) de referência.

### 7.3.2 Símbolos e definições de tolerâncias geométricas

Nos quadros 7.2, 7.3 e 7.4, apresentam-se os **símbolos** das diferentes características geométricas consideradas e símbolos complementares, definidos na ISO 1101 e noutras normas ISO, utilizados em indicações nos desenhos, neste domínio. As proporções e dimensões dos símbolos estão especificadas na ISO 7083.

No quadro 7.2, os símbolos indicados na coluna da esquerda permitem expressar todos os tipos de tolerâncias geométricas, enquanto os símbolos da coluna da direita cobrem os casos particulares que

ocorrem com mais frequência. Para tal, estes símbolos devem ser inscritos na primeira secção do “**indicador de tolerância**”, definido na secção 7.4.1 deste texto.

Quadro 7.2 – Símbolos das características geométricas toleranciadas

Tolerâncias	Características	Símbolos
Tolerâncias geométricas de elementos isolados <sup>a)</sup>		
<b>Forma</b>	Perfil de uma linha	
	Retitude	
	Circularidade	
	Perfil de uma superfície	
	Planeza	
	Cilindricidade	
Tolerâncias geométricas de elementos correlacionados <sup>b)</sup>		
<b>Orientação</b>	Perfil de uma linha	
	Perfil de uma superfície	
	Inclinação	
	Paralelismo	
	Perpendicularidade	
<b>Posição</b>	Perfil de uma linha	
	Perfil de uma superfície	
	Localização <sup>c)</sup>	
	Concentricidade	
	Coaxialidade	
	Simetria	
<b>Batimento</b>	Batimento circular	
	Batimento Total	
	Batimento circular radial Batimento circular axial Batimento total radial Batimento total axial	

<sup>a)</sup> Não necessitam de referências especificadas.

<sup>b)</sup> Necessitam de referências especificadas.





















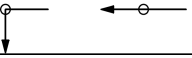

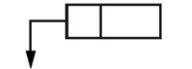
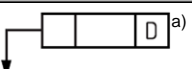
<sup>c)</sup> Podem necessitar ou não de referências especificadas.

Quadro 7.3 – Símbolos complementares definidos no ISO/DIS 1101.2

DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	REFERÊNCIA
<b>Componentes de especificação de combinação</b>		
Zona combinada ("combined zone")	CZ	Secção 7.4.1.2.1
Zonas separadas ("separate zones")	SZ	Secção 7.4.1.2.1
<b>Componentes de especificação de zona desigual ("unequal zone")</b>		
Zona assimétrica [deslocamento ("offset") especificado da zona de tolerância]	UZ	Secção 7.4.1.2.1
<b>Componentes de especificação de restrição ("constraint")</b>		
Zona de deslocamento ("offset") (deslocamento não especificado da zona de tolerância)	OZ	Secção 7.4.1.2.1
Ângulo variável	VA	Secção 7.4.1.2.1

(continua)






Quadro 7.3 – Símbolos complementares definidos no ISO/DIS 1101.2

DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	REFERÊNCIA
<b>Componentes de especificação de elemento toleranciado associado</b>		
Elemento minimax (Chebyshev)		Secção 7.4.1.2.2
Elemento de mínimos quadrados (gaussiano)		Secção 7.4.1.2.2
Elemento mínimo circunscrito		Secção 7.4.1.2.2
Elemento tangente		Secção 7.4.1.2.2
Elemento máximo inscrito		Secção 7.4.1.2.2
<b>Componentes de especificação de elemento derivado</b>		
Elemento mediano		Secção 7.4.1.2.2
Elemento toleranciado (ou de referência) projetado		Secções 7.4.1.2.2, 7.7 e 7.8.4.5
<b>Componentes de especificação de associação de elemento de referência</b>		
Elemento minimax (Chebyshev) sem restrição		Secção 7.4.1.2.3
Elemento minimax (Chebyshev) com restrição exterior à matéria		Secção 7.4.1.2.3
Elemento minimax (Chebyshev) com restrição interior à matéria		Secção 7.4.1.2.3
Elemento de mínimos quadrados (gaussiano) sem restrição		Secção 7.4.1.2.3
Elemento de mínimos quadrados (gaussiano) com restrição exterior à matéria		Secção 7.4.1.2.3
Elemento de mínimos quadrados (gaussiano) com restrição interior à matéria		Secção 7.4.1.2.3
Elemento mínimo circunscrito		Secção 7.4.1.2.3
Elemento máximo inscrito		Secção 7.4.1.2.3
<b>Identificadores de elemento toleranciado</b>		
Entre ("between")		Secções 7.3.4 e 7.5.1
Elemento unificado ("united feature")		Secções 7.4.3 e 7.5.1.1
Diâmetro menor ("minor diameter")		Secção 7.4.3
Diâmetro maior ("major diameter")		Secção 7.4.3
Diâmetro nos flancos ou diâmetro primitivo ("pitch diameter")		Secção 7.4.3
A toda a volta (do perfil) ("all around")		Secção 7.5.1.1
Em toda a envolvente ("all over")		Secção 7.5.1.1
<b>Indicador de tolerância</b>		
Indicação de especificação geométrica sem secção de "referências especificadas"		Secção 7.3.3
Indicação de especificação geométrica com secção de "referências especificadas"		Secção 7.4.1.3

<sup>a)</sup> As letras, valores e símbolos de características, inscritos nestes símbolos, são dados a título de exemplo.

(continua)

Quadro 7.3 – Símbolos complementares definidos no ISO/DIS 1101.2 (conclusão)

DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	REFERÊNCIA
<b>Indicadores de elemento auxiliar</b>		
Secção reta qualquer ("any cross section")	ACS	Secções 7.4.3 e 7.8
Indicador de plano de intersecção	 <sup>a)</sup>	Secção 7.4.2.1
Indicador de plano de orientação	 <sup>a)</sup>	Secção 7.4.2.2
Indicador de plano de direcção	 <sup>a)</sup>	Secção 7.4.2.3
Indicador de plano de colecção	 <sup>a)</sup>	Secção 7.4.2.4
<b>Símbolo de dimensão teoricamente exata</b>		
Dimensão teoricamente exata	 <sup>a)</sup>	Secção 7.6

<sup>a)</sup> As letras, valores e símbolos de características, inscritos nestes símbolos, são dados a título de exemplo.

Quadro 7.4 – Símbolos complementares definidos noutras normas

DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	REFERÊNCIA
<b>Componente de especificação da condição de matéria</b>		
Requisito de máximo de matéria		Ver capítulo 8 e a norma ISO 2692
Requisito de mínimo de matéria		Ver capítulo 8 e a norma ISO 2692
Requisito de reciprocidade		Ver capítulo 8 e a norma ISO 2692
<b>Componente de especificação de estado</b>		
Condição de estado livre (peças não rígidas) ("free state condition")		Secção 7.4.1.2.5 e norma ISO 10579
<b>Símbolos relacionados com referências especificadas</b>		
Indicador de elemento de referência ("datum feature indicator")	 <sup>a)</sup>	Recomenda-se a não utilização das letras I, O, Q e X, que podem ser mal interpretadas. O triângulo é equilátero. Secção 7.3.5 e norma ISO 5459.
Quadro de referência parcial simples ("single datum target frame")	 <sup>a)</sup>	Secção 7.8 e norma ISO 5459
Quadro de referência parcial móvel ("moveable datum target frame")		Secção 7.8 e norma ISO 5459
Ponto de referência parcial		Secção 7.8 e norma ISO 5459
Linha fechada de referência parcial		Secção 7.8 e norma ISO 5459
Linha não fechada de referência parcial		Secção 7.8 e norma ISO 5459
Área de referência parcial		Secção 7.8 e norma ISO 5459
Elemento de contacto	[CF]	Secção 7.8 e norma ISO 5459
Distância variável (para uma referência especificada comum)	[DV]	Secção 7.8 e norma ISO 5459
(elemento de situação de tipo) Ponto	[PT]	Secção 7.8 e norma ISO 5459
(elemento de situação de tipo) Linha	[SL]	Secção 7.8 e norma ISO 5459

<sup>a)</sup> As letras, valores e símbolos de características, inscritos nestes símbolos, são dados a título de exemplo.

(continua)

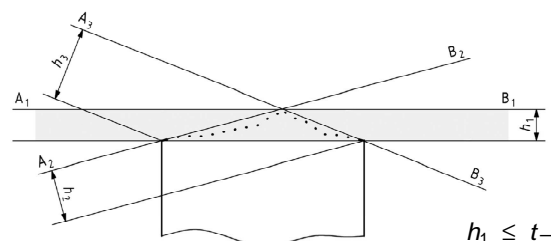
Quadro 7.4 – Símbolos complementares definidos noutras normas (conclusão)

DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	REFERÊNCIA
(elemento de situação de tipo) Plano	[PL]	Secção 7.8 e norma ISO 5459
Apenas para restrição de orientação	><	Secções 7.4.1.2.1 e 7.8 e norma ISO 5459
Secção longitudinal qualquer	ALS	Secção 7.8 e norma ISO 5459
<b>Símbolo relacionado com a tolerância de tamanho</b>		
Requisito de envolvente	Ⓔ	Ver o capítulo 6 e a norma ISO 14405-1

As **tolerâncias de forma** aplicam-se a cada um dos elementos geométricos toleranciados, independentemente da sua envolvente (**elementos isolados**). Especificam o valor máximo admissível dos correspondentes desvios geométricos em relação à configuração nominal dos elementos. Como as zonas das tolerâncias de forma não têm uma orientação específica, podem ser orientadas no espaço de modo a minimizar os valores dos desvios de forma. A **retitude** (propriedade de uma linha reta) e a **circularidade** (propriedade de uma circunferência) são casos especiais de características de forma de linhas e a **planeza** (propriedade de um plano) e a **cilindricidade** (propriedade de um cilindro) são casos especiais de características de forma de superfícies. Ver exemplos na figura 7.148.

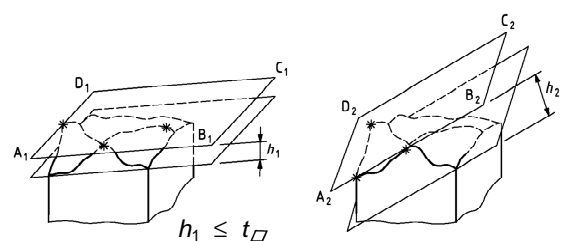
Com vista a caracterizar o modo como devem ser avaliados os desvios de forma dos elementos extraídos (reais), de maneira a poder compará-los com as correspondentes zonas de tolerância especificadas nos desenhos técnicos, a norma ISO 1101:1983 começou por estabelecer as seguintes **definições de zonas de tolerância**, baseadas em elementos geométricos ideais:

- **A retitude de um elemento toleranciado isolado** é considerada correta quando o elemento está contido entre duas linhas retas, cuja distância entre si é menor ou igual ao valor da tolerância especificada. A orientação das linhas retas deve ser escolhida de modo que a maior distância entre elas seja a mínima possível [ver figura 7.9 a)].



Orientações possíveis das linhas retas:  $A_1-B_1$   $A_2-B_2$   $A_3-B_3$   
 Distâncias correspondentes:  $h_1$   $h_2$   $h_3$   
 No caso da figura:  $h_1 < h_2 < h_3$   
 Em consequência, a orientação correta das linhas retas é  $A_1-B_1$ . A distância  $h_1$  deve ser menor ou igual à tolerância especificada.

a) Retitude

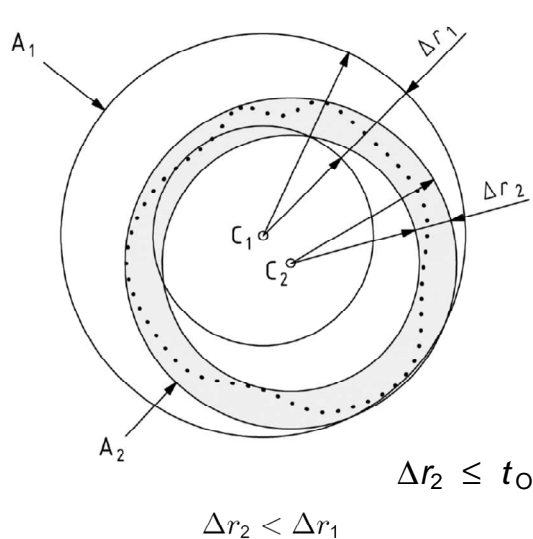


Orientações possíveis dos planos:  $A_1-B_1-C_1-D_1$   $A_2-B_2-C_2-D_2$   
 Distâncias correspondentes:  $h_1$   $h_2$   
 No caso da figura:  $h_1 < h_2$   
 Em consequência, a orientação correta dos planos é  $A_1-B_1-C_1-D_1$ . A distância  $h_1$  deve ser menor ou igual à tolerância especificada.

b) Planeza

Figura 7.9 – Definição de zonas de tolerância de características geométricas de forma. Adaptada da ISO 1101

- **A planeza de um elemento toleranciado isolado** é considerada correta quando o elemento está contido entre dois planos, cuja distância entre si é menor ou igual ao valor da tolerância especificada. A orientação dos planos deve ser escolhida de maneira que a maior distância entre eles seja a mínima possível [ver figura 7.9 b)].
- **A circularidade de um elemento toleranciado isolado** é considerada correta quando o elemento está contido entre duas circunferências concêntricas, cuja diferença de raios é menor ou igual à tolerância especificada. A posição dos centros dessas circunferências e o valor dos seus raios devem ser escolhidos de modo que a diferença de raios das duas circunferências concêntricas seja a mínima possível [ver figura 7.10 a)].



Posições possíveis dos centros das duas circunferências concêntricas e diferença de raios mínima.

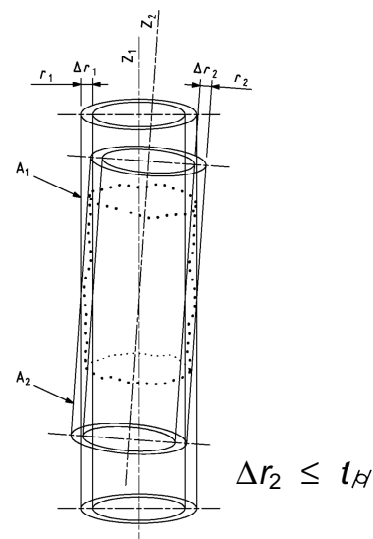
O centro ( $C_1$ ) de  $A_1$  posiciona duas circunferências concêntricas, com uma diferença de raios  $\Delta r_1$ .

O centro ( $C_2$ ) de  $A_2$  posiciona duas circunferências concêntricas, com uma diferença de raios  $\Delta r_2$ .

No caso da figura:  $\Delta r_2 < \Delta r_1$

Em consequência, a posição correta das duas circunferências concêntricas é a designada por  $A_2$ . A diferença de raios  $\Delta r_2$  deverá ser menor ou igual à tolerância especificada.

a) Circularidade



Posições possíveis dos centros dos dois cilindros coaxiais e diferença de raios mínima.

O eixo ( $Z_1$ ) de  $A_1$  posiciona dois cilindros coaxiais, com uma diferença de raios  $\Delta r_1$ .

O eixo ( $Z_2$ ) de  $A_2$  posiciona dois cilindros coaxiais, com uma diferença de raios  $\Delta r_2$ .

No caso da figura:  $\Delta r_2 < \Delta r_1$

Em consequência, a posição correta dos dois cilindros coaxiais é a designada por  $A_2$ . A diferença de raios  $\Delta r_2$  deverá ser menor ou igual à tolerância especificada.

b) Cilindricidade

Figura 7.10 – Definição de zonas de tolerância de características geométricas de forma. Adaptada da ISO 1101

- **A cilindridade de um elemento toleranciado isolado** é considerada correta quando o elemento está contido entre dois cilindros coaxiais, cuja diferença de raios é menor ou igual à tolerância especificada. A posição dos eixos desses cilindros e o valor dos seus raios devem ser escolhidos de maneira que a diferença de raios dos dois cilindros coaxiais seja a mínima possível [ver figura 7.10 b)].

Atualmente, de acordo com o projeto de norma ISO/DIS 1101.2, o critério normalizado, por omissão ("by default"), para as operações de associação (ver secção 4.6.4) utilizadas com as diferentes

características geométricas de forma, isto é, as condições que permitem ajustar um **elemento de referência** (ver o ponto 1, da secção 7.4.1.2.3 deste texto) ao elemento geométrico extraído, é o critério minimax (Chebyshev) sem quaisquer restrições. Estes conceitos são objeto de uma abordagem mais desenvolvida nas normas ISO 12180-1, ISO 12181-1, ISO 12780-1 e ISO 12781-1.

As **tolerâncias de perfil de uma linha e de perfil de uma superfície** aplicam-se a elementos geométricos que podem ser integrais ou derivados. Exceto nos casos de linhas retas ou de superfícies planas, a forma do elemento toleranciado deve estar definida explicitamente, por meio de indicações completas, fornecidas nos desenhos ou através de interrogações do modelo em CAD 3D. Ver exemplos na figura 7.149.

As **tolerâncias de orientação** dizem respeito a elementos geométricos correlacionados (associados) e limitam igualmente os desvios de forma dos elementos geométricos toleranciados, que podem ser elementos integrais ou derivados. Indicam o valor máximo admissível dos desvios de orientação dos elementos toleranciados, em relação à(s) referência(s) especificada(s). As zonas das tolerâncias de orientação têm orientações ideais (teoricamente exatas) em relação à(s) referência(s) especificada(s).

As tolerâncias de orientação de **inclinação, paralelismo e perpendicularidade** só se aplicam a linhas consideradas nominalmente retas e a superfícies consideradas nominalmente planas. As características de orientação entre este tipo de elementos são ângulos cuja variação é limitada indiretamente por zonas de tolerância de dimensão linear  $t$ , que englobam igualmente os desvios de forma (de retitude e/ou de planeza) do elemento toleranciado. O **paralelismo** e a **perpendicularidade** são, respetivamente, casos particulares de orientação  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Os ângulos teoricamente exatos que são sujeitos a restrições, entre o elemento toleranciado nominal e as referências especificadas devem ser definidos como dimensões teoricamente exatas implícitas ( $0^\circ$  ou  $90^\circ$ ). Nas tolerâncias de **inclinação**, um destes ângulos, pelo menos, deve ser definido por uma dimensão teoricamente exata explícita. Ver exemplos na figura 7.150.

As **tolerâncias de posição** dizem respeito a elementos geométricos correlacionados (associados) e limitam igualmente os desvios de forma e de orientação dos elementos geométricos toleranciados. As zonas de tolerância correspondentes são caracterizadas por um valor dimensional linear,  $t$ , que é o dobro do valor máximo admissível dos desvios de posição dos elementos toleranciados, em relação à(s) referência(s) especificada(s). As zonas das tolerâncias de posição, de dimensão  $t$ , têm orientações e posições ideais (teoricamente exatas), em relação à(s) referência(s) especificada(s).

As tolerâncias de posição de **localização, concentricidade, coaxialidade e simetria** só se aplicam a pontos, a linhas consideradas nominalmente retas ou a superfícies consideradas nominalmente planas. A **concentricidade** e a **coaxialidade** (quando os elementos correlacionados são cilíndricos) e a **simetria** (quando, pelo menos, um dos elementos correlacionados é prismático) são casos particulares em que a distância nominal entre o eixo ou plano mediano do elemento toleranciado e o eixo ou plano mediano do elemento de referência é de 0 mm. Ver exemplos na figura 7.151.

As **tolerâncias de perfil de uma linha e de perfil de uma superfície correlacionadas a uma referência especificada** (“datum”) aplicam-se a elementos geométricos que podem ser integrais ou derivados. Exceto nos casos de linhas retas ou de superfícies planas, a forma do elemento toleranciado deve estar definida explicitamente, por meio de indicações completas fornecidas nos desenhos ou através de interrogações do modelo em CAD 3D. **Se a especificação for apenas de orientação**, o componente de especificação  $\text{><}$  (ver o ponto 4, da secção 7.4.1.2.1) deve ser inscrito na segunda secção (compartimento) do indicador de tolerância ou após cada uma das indicações das referências especificadas existentes no indicador de tolerância, ou então não deve ser indicada qualquer referência especificada capaz de restringir uma translação não redundante. **Se a especificação for de posição**, deve ser inscrita, no indicador de tolerância, pelo menos uma referência especificada que restrinja uma translação não redundante. As dimensões lineares e angulares, restringidas entre o elemento toleranciado nominal e as referências especificadas, devem ser definidas como dimensões teoricamente exatas implícitas e/ou explícitas. Ver exemplos na figura 7.149.

As **tolerâncias de batimento** são tolerâncias globais e compostas utilizadas para controlar a relação funcional de uma ou mais características geométricas de um elemento integral, em relação a um eixo de referência. O batimento pode ser circular ou total e cada um deles pode ser radial ou axial. As tolerâncias de batimento aplicam-se a elementos de revolução. Estas tolerâncias são, em parte, tolerâncias de orientação (tolerâncias de batimento circular axial e de batimento total axial) e, em parte, tolerâncias de posição (tolerâncias de batimento circular radial e de batimento total radial).

- a) O **batimento circular** é um desvio global, que conjuga desvios de forma, de orientação e de posição, verificado durante a rotação de um elemento integral em torno de um eixo de referência. Os elementos nominais toleranciados podem ser linhas circulares ou um conjunto de linhas circulares que são elementos do tipo linha. O **desvio de batimento circular radial** inclui o desvio de concentricidade e partes do desvio de circularidade do elemento controlado, enquanto o **desvio de batimento circular axial** é igual ao desvio de perpendicularidade da linha da secção circular da superfície, mas poderá ser menor do que os desvios de planeza e de perpendicularidade da totalidade da superfície controlada. Ver exemplos na figura 7.152.
- b) O **batimento total** é um desvio global, que conjuga desvios de forma, de orientação e de posição (coaxialidade), verificado durante a rotação de um elemento integral em torno de um eixo de referência. Os elementos nominais toleranciados podem ser superfícies cilíndricas ou superfícies planas. Diz respeito à totalidade da superfície especificada e é verificado em cada ponto desta, através de um movimento relativo entre a peça e o instrumento de medição, segundo a direção especificada, enquanto a peça efetua uma série de rotações em torno do eixo de referência. O **desvio de batimento total radial** engloba contribuições dos desvios de cilíndricidade (retitude e paralelismo das geratrizes) e de coaxialidade do elemento toleranciado. O **desvio de batimento total axial** resulta da conjugação dos desvios de planeza e de perpendicularidade do elemento toleranciado. Ver exemplos na figura 7.152.



### 7.3.3 Indicação de elementos toleranciados

Uma especificação geométrica aplica-se a um elemento simples completo, a menos que seja indicado um símbolo modificador apropriado (ver secções 7.4.3 e 7.5 deste texto).

Quando a especificação geométrica se refere a um **elemento integral**, a indicação da especificação (ver secção 7.4.1) deve estar ligada ao elemento tolerenciado através de uma linha de referência e de uma linha de indicação, que termina de uma das seguintes maneiras:

- Em anotação 2D, no contorno do elemento ou na sua extensão (mas claramente separada da linha de cota) [ver figuras 7.11 a) e b)]. A extremidade da linha de indicação é uma **seta** que também poderá tocar numa linha de referência, ligada à superfície através de uma linha de indicação [ver figura 7.11 c)], ou um **ponto**, quando a linha de indicação termina no interior do elemento.

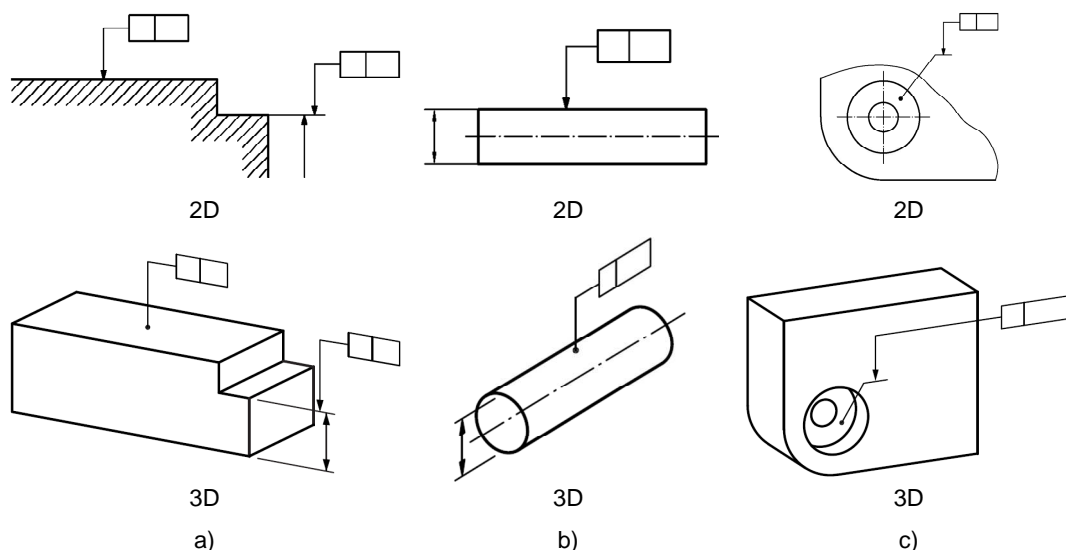


Figura 7.11 – Exemplos de indicação de especificação geométrica em elementos integrais. Adaptada da ISO 1101

- Em anotação 3D, no interior do elemento integral, por meio de um **ponto** [ver figuras 7.11 a) e b)]. A extremidade da linha de indicação poderá também ser uma **seta** que toca numa linha de extensão ou numa linha de referência, ligada à superfície através de uma linha de indicação [ver figuras 7.11 a) e c)].

Quando a especificação geométrica se refere a um **elemento derivado** (linha mediana, superfície mediana ou ponto mediano), a indicação da especificação deve estar ligada ao elemento tolerenciado através de uma linha de referência e de uma linha de indicação, que termina de uma das seguintes maneiras:

- No prolongamento da linha de cota de um elemento de tamanho, por intermédio de uma **seta** [ver figuras 7.12 a), b) e c)].

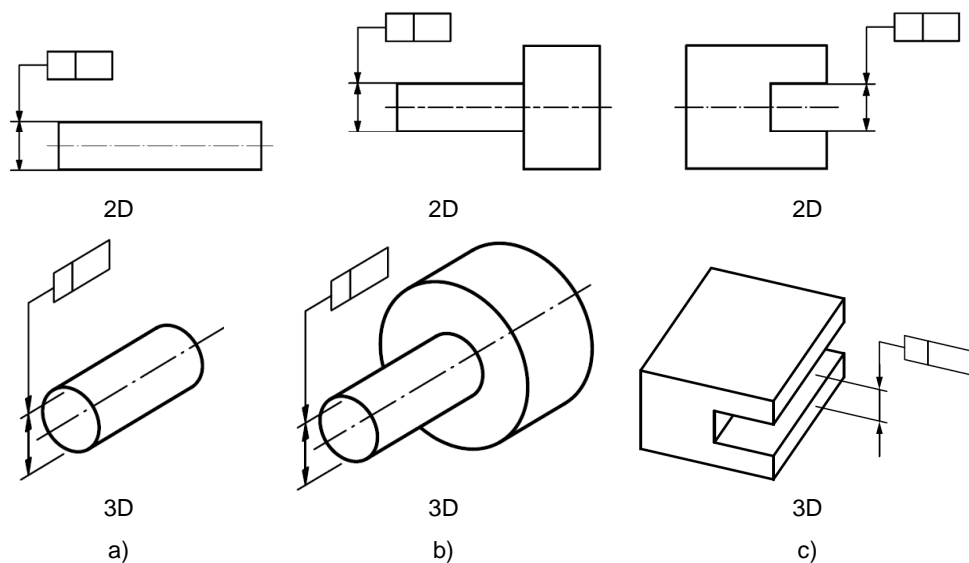


Figura 7.12 – Exemplos de indicação de especificação geométrica em elementos derivados. Adaptada da ISO 1101

- No contorno do elemento ou na sua linha de extensão (mas claramente separada da linha de cota), por meio de uma **seta**, ou no interior do elemento integral, através de um **ponto**, no caso de uma superfície de revolução, se tiver sido inscrito um símbolo modificador **(A)** (elemento mediano) no lado direito do segundo compartimento do indicador de tolerância, quando a tolerância se aplica ao elemento mediano de um elemento de tamanho assim cotado, ver figura 7.13.

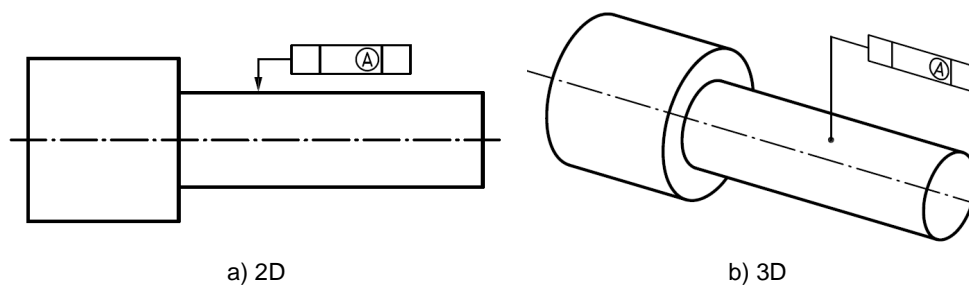


Figura 7.13 – Exemplo de elemento toleranciado: linha mediana de superfície cilíndrica. Adaptada da ISO 1101

### 7.3.4 Zonas de tolerância

A **zona de tolerância** deve ser posicionada simetricamente em relação ao elemento teoricamente exato (TEF – “*theoretically exact feature*”), salvo indicação em contrário (ver ponto 3, da secção 7.4.1.2.1, deste texto). O valor  $t$  da tolerância define a **largura da zona de tolerância** que é estabelecida segundo a direção normal à geometria especificada (ver figura 7.14), salvo indicação em contrário (ver figura 7.15).

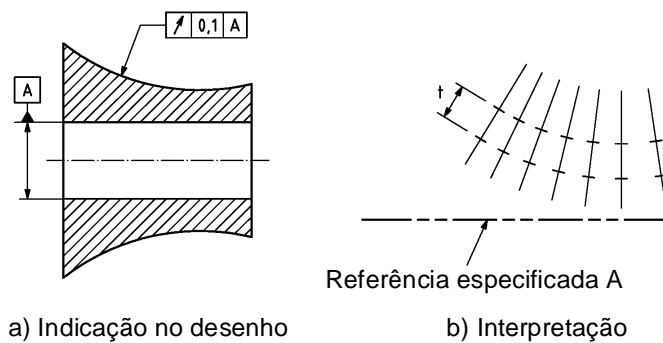


Figura 7.14 – Largura da zona de tolerância numa direção normal à geometria especificada. Adaptada da ISO 1101

A orientação da linha de indicação, por si só, não tem qualquer influência na definição da zona tolerância, exceto se essa orientação for indicada através de uma dimensão teoricamente exata (ver figura 7.15). O ângulo  $\alpha$ , representado na figura 7.15, deve ser sempre indicado, mesmo que seja igual a  $90^\circ$ .

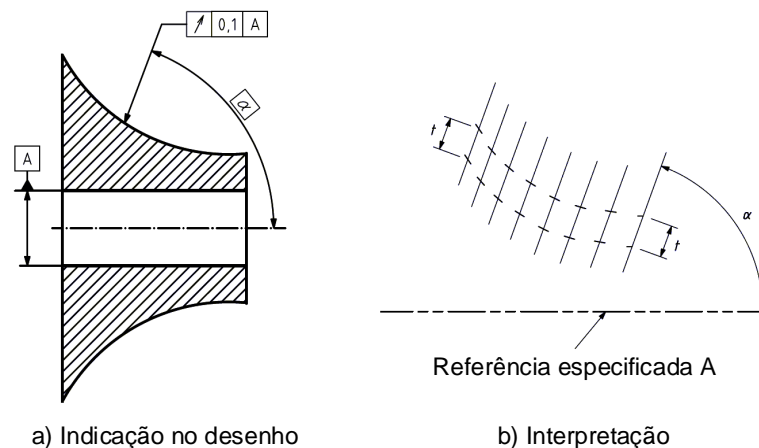


Figura 7.15 – Largura da zona de tolerância estabelecida na direção especificada. Adaptada da ISO 1101

No caso da **circularidade** de superfícies de revolução não cilíndricas nem esféricas, a direção da largura da zona de tolerância deve ser sempre indicada (ver secção 7.4.2.3 deste texto).

O valor  $t$  da tolerância é constante ao longo do comprimento do elemento considerado, salvo especificação em contrário, materializada por meio de uma indicação gráfica que define uma variação proporcional, de um valor a outro, entre duas posições especificadas no elemento considerado, identificadas por letras maiúsculas, que são também inscritas sobre o indicador de tolerância separadas pelo **símbolo “entre”** (ver figura 7.16).

Para elementos derivados, no caso de uma zona de tolerância definida por dois planos paralelos que delimitam uma linha mediana ou de uma zona constituída por um cilindro que delimita o centro de um círculo ou de uma esfera, a direção da largura da zona de tolerância deve ser controlada por intermédio de um indicador de plano de orientação (ver secção 7.4.2.2 deste texto).

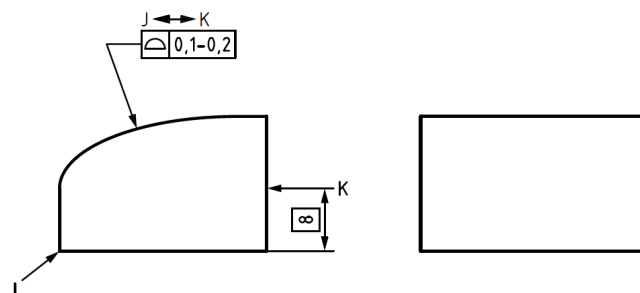


Figura 7.16 – Exemplo de indicação de uma variação proporcional do valor da tolerância (de J até K). Adaptada do ISO/DIS 1101.2

A zona de tolerância deve ser cilíndrica (ver figura 7.17) ou circular, se o valor da tolerância for precedido do **símbolo “Ø”**, ou esférica se for precedido do **símbolo “SØ”**.

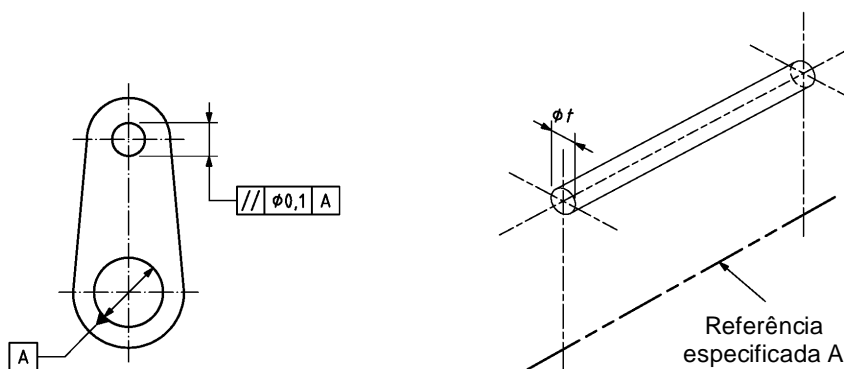


Figura 7.17 – Zona de tolerância cilíndrica. Adaptada da ISO 1101

### 7.3.5 Indicação de referências especificadas

De acordo com a norma ISO 5459, uma **referência especificada** (“datum”) pode ser constituída por um ou mais elementos de situação de um ou mais elementos associados a um ou mais elementos integrais reais, seleccionados para definir a posição e/ou a orientação de uma zona de tolerância ou de um elemento ideal que representa, por exemplo, uma condição virtual (ver ISO 2692). Na secção 7.8 deste texto, estes conceitos são objeto de uma abordagem mais desenvolvida.

Uma referência especificada, com a qual esteja correlacionado um elemento toleranciado, deve ser identificada por intermédio de uma letra maiúscula de referência, inscrita num quadro ligado a um triângulo de referência, enegrecido ou não, formando aquilo que se designa por um **“indicador de elemento de referência”** (ver figura 7.18). A letra de referência deve ser repetida na secção respetiva do correspondente “indicador de tolerância” (ver secção 7.4.1.3).

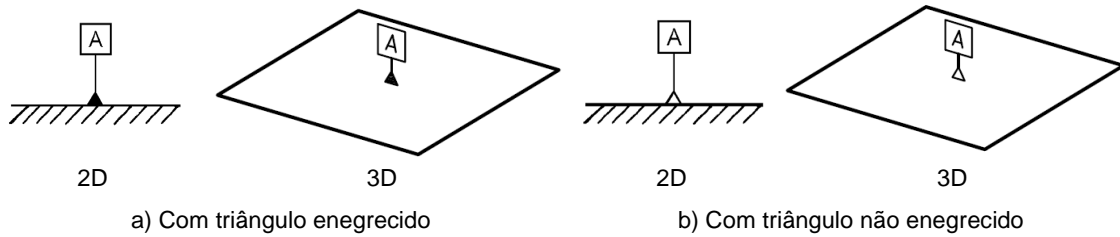


Figura 7.18 – Exemplos de indicadores de elemento de referência. Adaptada da ISO 1101

O indicador de elemento de referência deve ser colocado:

- Em anotação 2D, na linha de contorno do elemento ou sobre uma linha de extensão (mas claramente separado da linha de cota), quando a referência especificada é a linha ou a própria superfície representada (**elementos integrais**), ver figura 7.19 a). O triângulo de referência pode também ser colocado sobre uma linha de referência, ligada à superfície através de uma linha de indicação, ou unido diretamente a um indicador de tolerância, ver figuras 7.19 b) e c).

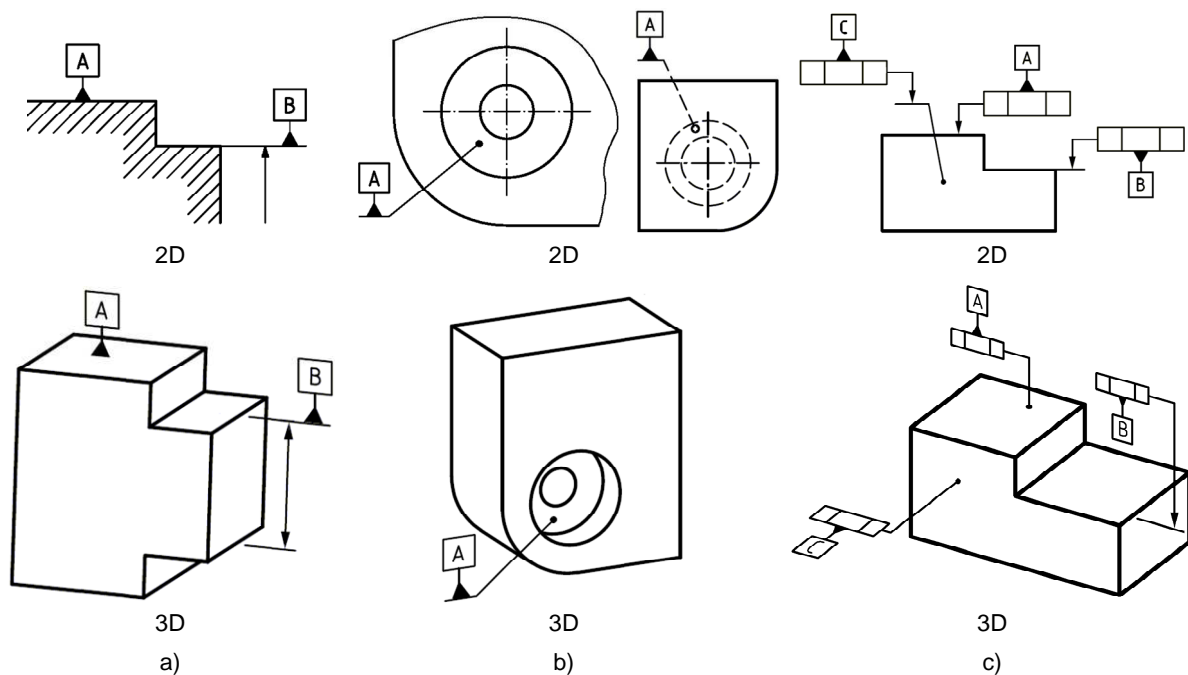


Figura 7.19 – Exemplos de colocação de indicadores de elemento de referência. Adaptada da ISO 1101

- Em anotação 3D, no próprio elemento ou sobre uma linha de extensão [figura 7.19 a)], sobre uma linha de referência, ligada à superfície através de uma linha de indicação, ou unido diretamente a um indicador de tolerância, quando a referência especificada é estabelecida a partir de um elemento de referência que não é um elemento de tamanho, ver figuras 7.19 b) e c).
- No prolongamento da linha de cota ou ligado a um indicador de tolerância a ela apontado, quando a referência especificada é o eixo, o plano mediano ou o centro (**elemento derivado**) do elemento assim cotado. Se não houver espaço suficiente para duas setas, uma delas pode ser substituída pelo triângulo de referência. Ver exemplos para anotações 2D e 3D, na figura 7.20.

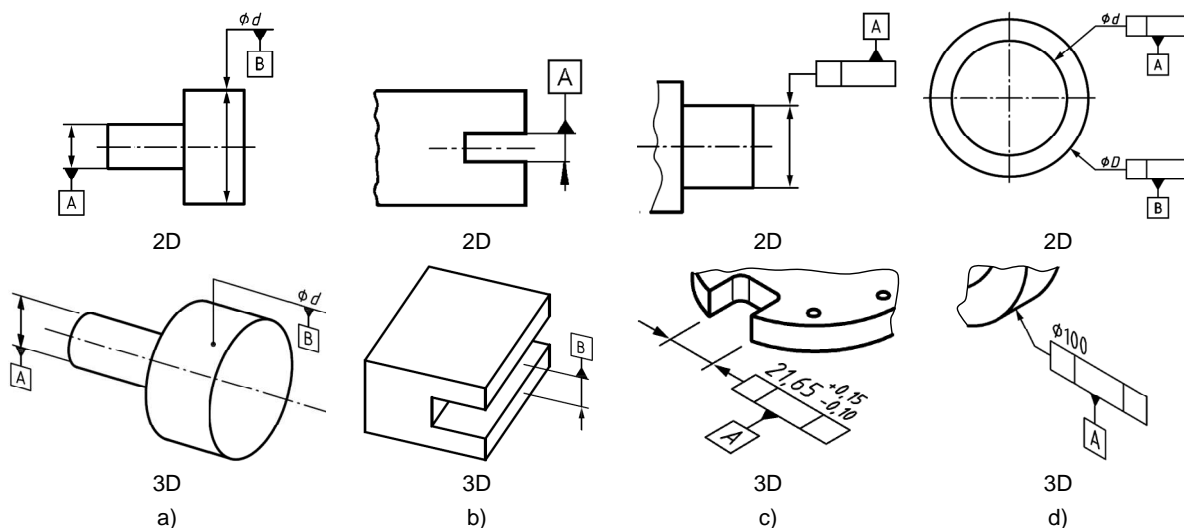


Figura 7.20 – Exemplos de colocação de indicadores de elemento de referência para elementos derivados.  
Adaptada das normas ISO 1101 e ISO 5459

## 7.4 Indicação de uma especificação geométrica

Uma indicação de especificação geométrica é constituída por um “**indicador de tolerância**”, por indicações facultativas de elementos geométricos auxiliares [plano(s) ou elemento] e por indicações adjacentes suplementares.

### 7.4.1 Indicador de tolerância

Os requisitos de uma especificação geométrica devem ser indicados num quadro retangular que está dividido em duas ou três secções. A secção de “referências especificadas”, que é a terceira e é opcional, poderá ser constituída por um número de compartimentos que pode variar de um a três (ver figura 7.21).

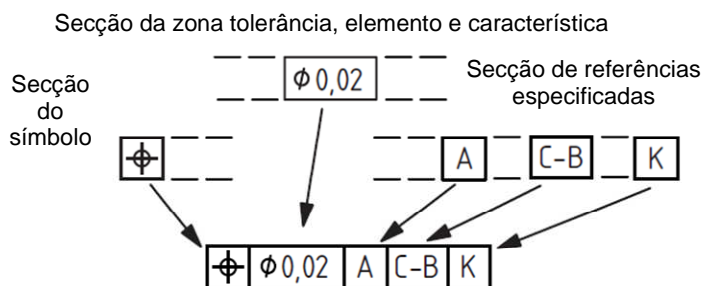


Figura 7.21 – As três secções constituintes de um indicador de tolerância. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

#### 7.4.1.1 Secção do “símbolo”

A **secção do “símbolo”** do indicador de tolerância deve conter o símbolo relativo à característica geométrica sujeita a toleranciamento (ver quadro 7.2).

### 7.4.1.2 Secção da “zona de tolerância, elemento e característica”

Os componentes de especificação que podem ser utilizados na **secção da “zona de tolerância, elemento e característica”** estão indicados na figura 7.22. Esta figura mostra também o agrupamento e a sequência em que estes componentes de especificação devem ser inscritos.

Zona de tolerância					Elemento toleranciado				Característica		Condição de matéria	Estado
Forma	Largura	Comb.	Assimétrica	Res-trição	Filtro		Elem. ass. toleranc.	Elemento derivado	Associação	Parâmetro		
					Tipo	Índices						
$\phi$	0,02	CZ	UZ+0,2	OZ	G	0,8	Ⓒ	Ⓐ	C CE CI	P	Ⓜ	Ⓕ
$S\phi$	0,02-0,01	SZ	UZ-0,3	VA	S	-250	Ⓓ	Ⓟ	G GE GI	V	Ⓛ	
	0,1/75		UZ+0,1↔+0,2	><	etc.	0,8-250	Ⓝ		X	T	Ⓡ	
	0,1/75×75		UZ+0,2↔-0,3			500	Ⓣ		N	Q		
	0,2/φ4		UZ-0,2↔-0,3			-15	ⓧ					
	0,2/75×30°					500-15						
	0,3/10°×30°					etc.						
1a	1b	2	3	4	5a	5b	6	7	8	9	10	11

**NOTA:** a lista de símbolos modificadores poderá vir a ser alargada.

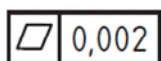
Figura 7.22 – Componentes de especificação na secção da “zona de tolerância, elemento e característica” do indicador de tolerância. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

#### 7.4.1.2.1 Componentes de especificação da zona de tolerância

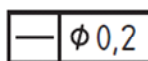
##### 1) Componentes de especificação da forma e largura (colunas 1a e 1b da figura 7.22)

As diferentes configurações da zona de tolerância dependem da característica geométrica a toleranciar e do modo como esta está cotada (ver figura 7.8). Se o elemento toleranciado for uma linha ou um ponto e a zona de tolerância for um círculo, um cilindro ou um tubo circular, o valor da tolerância deve ser precedido do **símbolo “Ø”** [ver figura 7.23 b)]. Se o elemento toleranciado for um ponto e a zona de tolerância for esférica, o valor da tolerância deve ser precedido do **símbolo “SØ”** [ver figura 7.23 c)].

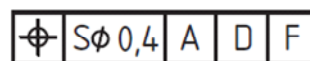
O valor da tolerância é um componente de especificação obrigatório. Este valor deve ser especificado nas unidades utilizadas para as dimensões nominais (por omissão, em mm, no caso da engenharia mecânica), ver figura 7.23. O valor da tolerância fornece a largura da zona de tolerância que, por omissão, é perpendicular ao elemento toleranciado.



a) Tolerância de planeza



b) Tolerância de retitude



c) Tolerância de localização

Figura 7.23 – Exemplos de especificação da forma e largura da zona de tolerância. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Por omissão, a zona de tolerância tem uma largura constante (ver figura 7.23). No entanto, se a largura da zona de tolerância variar linearmente entre dois valores, estes devem ser indicados separados por um **símbolo “-”** (ver figura 7.16). Complementarmente, deve ser utilizada uma indicação adjacente, constituída por duas letras maiúsculas separadas pelo **símbolo “entre”**, que

identificam as posições em que se aplica cada um daqueles valores (ver figura 7.16). Se a variação não for linear, a sua indicação deve ser efetuada de modo apropriado.

Por omissão, uma tolerância aplica-se a toda a extensão do elemento considerado. Se a tolerância se aplicar apenas a uma porção restrita qualquer, no interior da extensão total do elemento, a grandeza dessa porção restrita, expressa em unidades lineares ou angulares, ou em ambas, (conforme aplicável) deve ser indicada após o valor da tolerância e separado deste através de uma **barra inclinada**, ver exemplos na figura 7.24.



Figura 7.24 – Exemplos de especificações restritivas. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

## 2) Componente de especificação de combinação (coluna 2 da figura 7.22)

No caso de ser estabelecida a mesma especificação para vários elementos, ver figuras 7.25 e 7.26, deve indicar-se o modo como esta se aplica em cada um dos elementos. Atendendo ao **princípio de independência** (ISO 8015), por omissão, o requisito de especificação para cada elemento deve ser interpretado de modo independente (ver figura 7.25). Para realçar este facto, em termos opcionais, pode inscrever-se também, no indicador de tolerância, o **símbolo SZ** (ver quadro 7.3), que significa “zonas separadas”.

Se uma **zona de tolerância combinada** se aplicar a vários elementos separados, ou se várias zonas de tolerância combinadas (controladas pelo mesmo indicador de tolerância) forem estabelecidas simultaneamente em vários elementos separados (de modo não independente) este requisito deve ser indicado por meio do **símbolo CZ**, que significa “zona combinada” e era anteriormente designada por “zona comum” (ver figura 7.26).

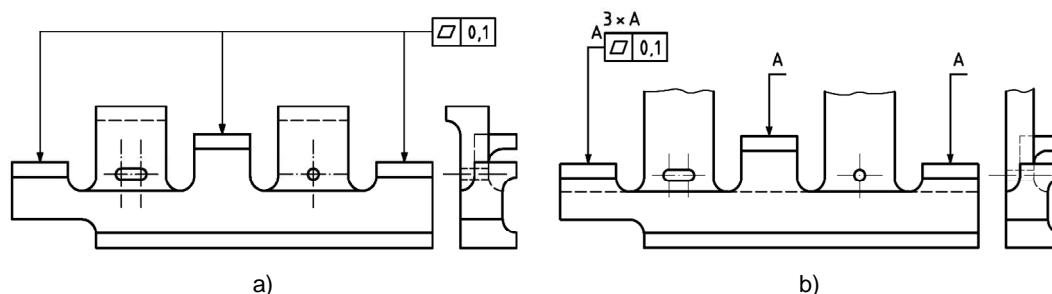


Figura 7.25 – Exemplos de aplicação da mesma especificação a vários elementos. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Esta indicação deve ser complementada pela informação de que a especificação se aplica a vários elementos, utilizando, p. ex., a inscrição “**3x**” na zona de indicação adjacente superior/inferior ao indicador de tolerância (ver secção 7.4.3 deste texto) ou, em alternativa, três linhas de indicação ligadas ao indicador de tolerância [ver figura 7.26 a)], mas não ambas.



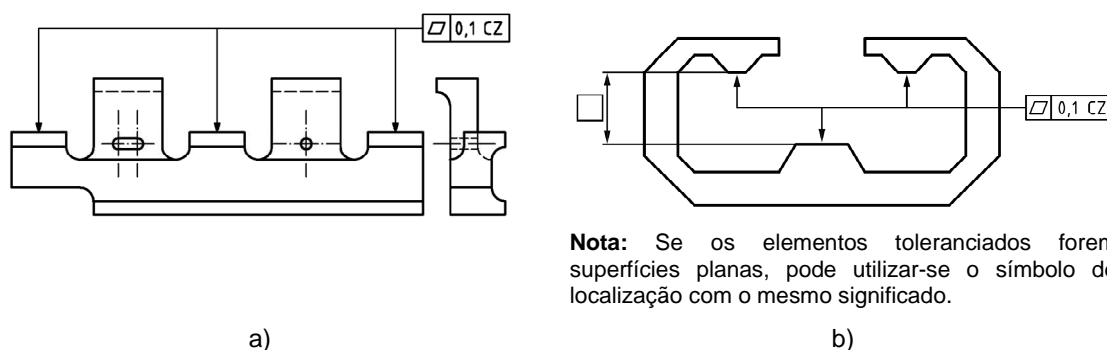


Figura 7.26 – Exemplos de indicação do símbolo “CZ” para zona combinada. Adaptada da ISO 1101.2

Se o símbolo **CZ** for inscrito no indicador de tolerância (ver figura 7.26), todas as zonas de tolerância individuais correlacionadas devem ser restringidas, entre elas, em posição e em orientação, através da utilização de **dimensões teoricamente exatas** (TED – “*theoretically exact dimensions*”) explícitas ou implícitas (0 mm, 0°, 90°, 180°, 270° ou elementos igualmente espaçados numa circunferência completa), ver exemplo na figura 7.28 b).

Em conformidade com o projeto de norma ISO/DIS 5458.2:2016, os símbolos modificadores **SZ** e **CZ** são utilizados para caracterizar adequadamente diferentes tipos de configurações de elementos, sendo que uma **configuração** (“*pattern*”) pode ser definida como um elemento composto formado por um conjunto de elementos individuais com orientação e/ou posição nominais definidas entre si (sem qualquer prioridade). Uma configuração pode ser **homogénea**, se composta por vários elementos com a mesma geometria nominal e regida por meio de uma especificação geométrica elementar (ver figura 7.27), ou **não homogénea**, se composta por vários elementos com mais do que uma geometria nominal e regida por meio de mais do que uma especificação geométrica elementar (ver figura 7.28).

Com a adoção, por omissão, do princípio de independência, em 2010, uma especificação geométrica, sem qualquer símbolo modificador, aplicada a  $n$  elementos geométricos, é equivalente a  $n$  especificações geométricas independentes. Cada elemento geométrico deve ser considerado individualmente tal como cada especificação geométrica, ver figura 7.27 a). As zonas de tolerância independentes daí resultantes correspondem a uma indicação implícita do modificador **SZ** (“zonas separadas”), que também pode ser indicado explicitamente, conforme assinalado na figura 7.27 b). Nestes casos, a dimensão 50 (25 + 25) não é considerada como uma restrição entre elas.

Para se criar uma **configuração** (“*pattern*”) **homogénea**, deve inscrever-se o modificador **CZ** na secção da “zona de tolerância” do indicador de tolerância. As restrições de orientação e de posição entre as zonas de tolerância dos elementos da configuração devem ser definidas através de dimensões teoricamente exatas, ver figuras 27 c) a f). No exemplo da figura 27 e), os eixos das duas zonas cilíndricas de tolerância estão sujeitos a uma restrição de localização de 50 mm e a uma restrição de orientação implícita de 0° entre si (paralelismo dos eixos), mas não têm qualquer restrição exterior derivada de uma referência especificada. Finalmente, no caso da figura 27 f), os

eixos das duas zonas cilíndricas de tolerância estão sujeitos apenas a uma restrição de orientação implícita de  $0^\circ$  entre si (o **símbolo modificador**  $\>\<$  elimina a restrição de posição), mas sem qualquer restrição exterior derivada de uma referência especificada.

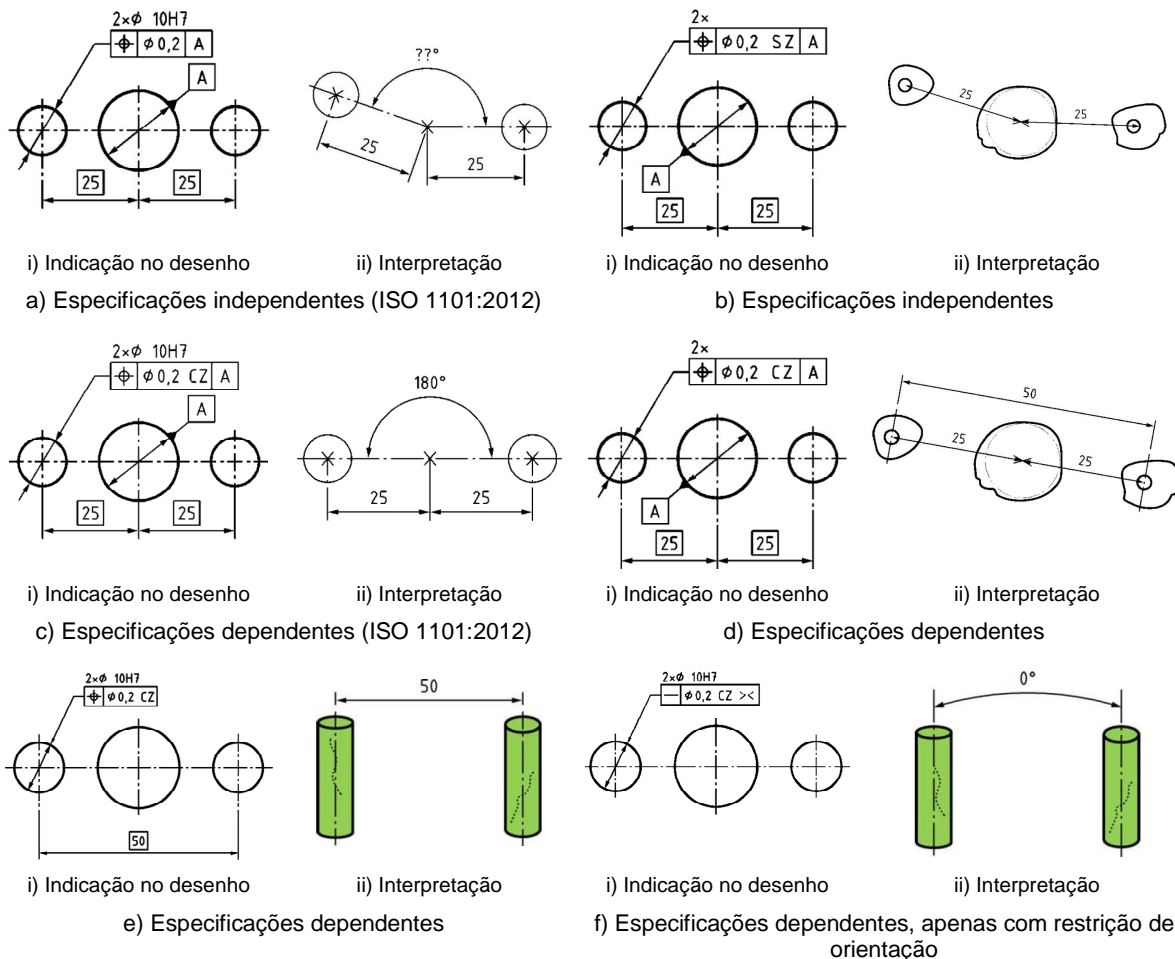


Figura 7.27 – Exemplos de especificações independentes em elementos de repetição e de especificações dependentes em configurações (“patterns”) homogêneas de elementos. Adaptada do ISO/DIS 5458.2

No caso de uma **configuração** (“pattern”) **não homogênea**, em que as zonas de tolerância, correspondentes às várias especificações geométricas indicadas separadamente, são consideradas não de modo independente mas com restrições de orientação e de posição definidas entre elas (requisito simultâneo), em conjunto com a inscrição do modificador **CZ** na secção da “zona de tolerância” do indicador de tolerância, deve indicar-se também o **símbolo modificador SIM** (requisito simultâneo), seguido de um número (**SIM**) se necessário, junto de cada especificação geométrica correlacionada.

Na figura 7.28, apresenta-se um exemplo com uma especificação de duas tolerâncias de localização diferentes aplicadas a diversos elementos constituintes de uma configuração não homogênea, onde se pode observar a prática atual e a prática prevista com a futura edição da norma ISO 5458. Para evitar a ocorrência de qualquer ambiguidade, quando se estabelece uma especificação de localização aplicada a vários elementos e nem todos os graus de liberdade não redundantes para as zonas de

tolerância foram eliminados (ver secção 7.8 deste texto), no futuro deverá ser sempre indicado um modificador **SZ** ou um modificador **CZ**.

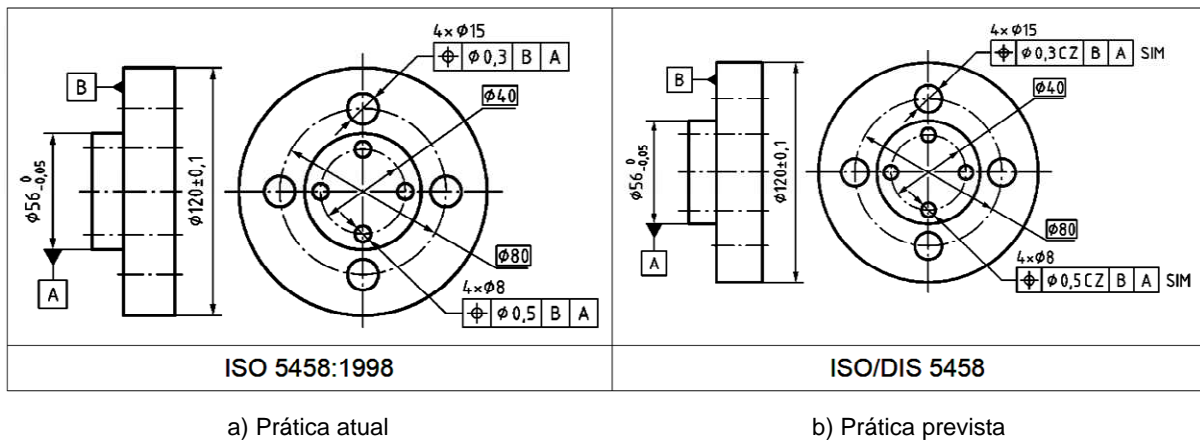


Figura 7.28 – Exemplo das mudanças operadas na indicação de tolerâncias de localização em configurações não homogêneas de elementos com a utilização do símbolo “CZ” para a especificação de uma zona combinada. Adaptada do ISO/DIS 5458.2

No entanto deve registrar-se que não há qualquer diferença funcional entre o uso ou o não uso do conceito de configuração (“*pattern*”), introduzido através da indicação do modificador **CZ**, quando as especificações que regem as configurações (compostas por  $n$  elementos geométricos) utilizam um sistema de referências especificadas que elimina todos os graus de liberdade correlacionados das zonas de tolerância.

Finalmente, na figura 7.29, apresenta-se um exemplo de aplicação em que quatro especificações diferentes são utilizadas com configurações e em condições diversas. Para permitir fazer a identificação de uma dada configuração (“*pattern*”) recorre-se a uma linha a traço longo-dois pontos fino com uma letra de identificação a ela ligada.

- A primeira especificação (**CZ SZ**, sem qualquer referência especificada) controla quatro configurações independentes C, cada uma delas constituída por dois elementos cilíndricos D.
- A segunda especificação (**CZ CZ**, sem qualquer referência especificada) controla quatro configurações dependentes C, que dão origem a uma única especificação aplicada a uma configuração constituída pelos oito ( $4 \times 2$ ) elementos cilíndricos D.
- A terceira especificação (**CZ SZ**, com a referência especificada B) define quatro configurações independentes C, cada uma delas constituída por dois elementos cilíndricos D, restringidas em posição a partir da referência especificada B.
- A quarta especificação (**CZ CZ**, com o sistema de referências especificadas B e A) controla quatro configurações dependentes C, que dão origem a uma única especificação aplicada a uma configuração constituída pelos oito ( $4 \times 2$ ) elementos cilíndricos D, restringida em posição a partir do sistema de referências especificadas B e A.

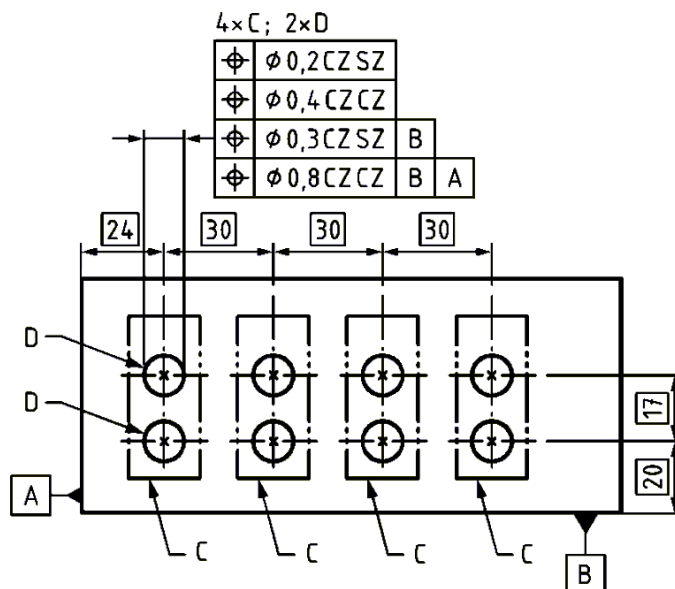
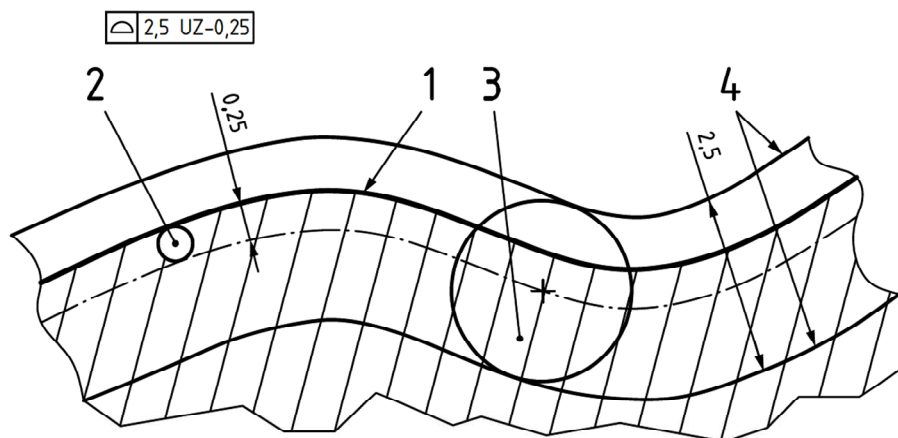


Figura 7.29 – Exemplo de identificação de uma configuração de repetição. Adaptada do ISO/DIS 5458.2

### 3) Componente de especificação de zona de tolerância assimétrica (coluna 3 da figura 7.22)

Por omissão, a zona de tolerância é centrada em relação ao elemento teoricamente exato. A especificação de um deslocamento (“offset”) da zona de tolerância é um componente opcional. Para tal, em especificações do perfil de linhas ou superfícies complexas, poder-se-á utilizar o **componente de especificação UZ** (“unequally disposed tolerance zone”), com ou sem referências especificadas (ver figura 7.30). Este procedimento só é válido para elementos integrais.



Legenda:

- 1 – Elemento teoricamente exato (TEF) complexo e único, em que a matéria está abaixo do perfil
- 2 – Esfera que define o deslocamento (“offset”) do elemento teórico
- 3 – Esfera que define a zona de tolerância
- 4 – Limites da zona de tolerância

Nota: Para especificações do perfil de linhas ou superfícies complexas, o componente de especificação UZ poderá ser utilizado com ou sem referências especificadas

Figura 7.30 – Zona de tolerância assimétrica com deslocamento (“offset”) especificado (ISO/DIS 1101.2)

Nestes casos (ver figura 7.30), a superfície extraída deve estar contida entre duas superfícies equidistantes (4) envolvendo esferas (3), de diâmetro definido igual ao valor da tolerância, cujos centros estão situados numa superfície correspondente à envolvente de esferas (2) que estão em contacto com o elemento teoricamente exato (1) e cujo diâmetro é igual ao valor absoluto do deslocamento inscrito, no indicador de tolerância, após **UZ**, sendo o correspondente sentido expresso pelo sinal “+”, que indica “do lado exterior da matéria”, e pelo sinal “-“, que indica “do lado interior da matéria”.

Para elementos planos, o componente de especificação **UZ** pode também ser utilizado em combinação com o símbolo da característica “localização”, ver figura 7.31.

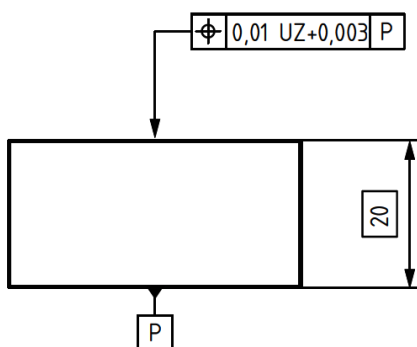


Figura 7.31 – Especificação de uma zona de tolerância assimétrica num elemento plano (ISO/DIS 1101.2)

Se o deslocamento (“*offset*”) da zona de tolerância variar linearmente entre dois valores, esses valores devem ser especificados separados pela indicação “<->”, tal como p. ex. **UZ +0,1<->+0,2**. Para identificar as extremidades da zona de tolerância, onde se aplicam os valores da translação inscritos no indicador de tolerância, deve recorrer-se a uma indicação adjacente composta por duas letras separadas pelo símbolo “entre” (ver figura 7.16). Se a variação do deslocamento (“*offset*”) não for linear, a sua especificação deve ser efetuada de um modo considerado adequado.

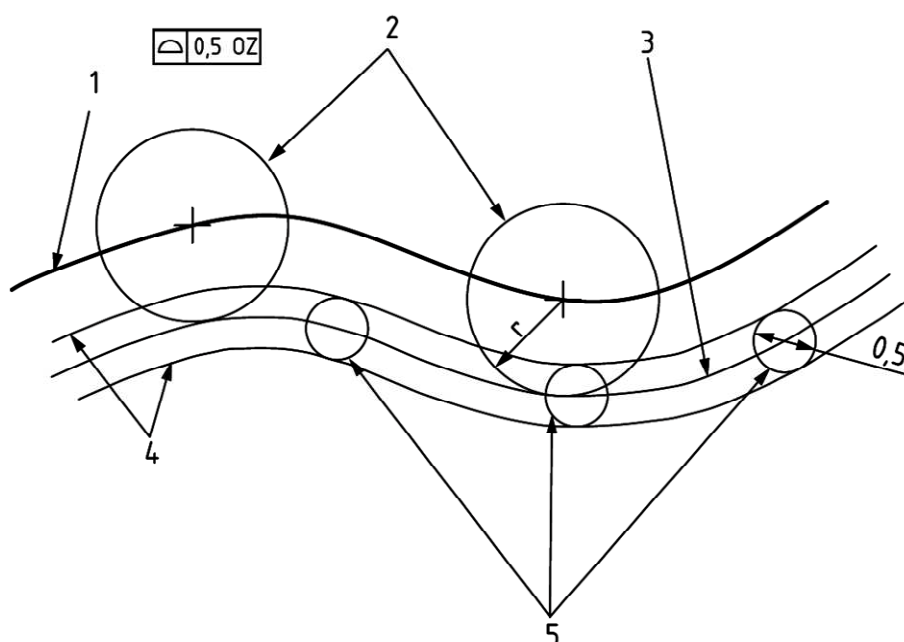
O conceito de zona de tolerância de perfil assimétrica é utilizado, frequentemente, em componentes de chapa obtidos por conformação, podendo citar-se, a título de exemplo, os casos dos painéis dos automóveis e dos aviões.

Muitos destes componentes são concebidos e as suas matrizes são produzidas diretamente a partir de modelos 3D, sem a indicação de quaisquer dimensões e que, em muitos casos, não poderiam, mesmo, ser cotados, uma vez que as suas superfícies são “*splines*” ou foram definidas em termos matemáticos. A sua inspeção é realizada em máquinas de medição de coordenadas (CMM), onde a peça é comparada com o modelo sólido, sem o auxílio de um desenho ou de uma representação perspetiva, e apenas com a informação necessária em termos de cotagem e toleranciamento geométricos, de materiais, de revestimentos, etc.

Nestes casos, qualquer necessidade de alteração de especificações das posições das zonas de tolerância em elementos geométricos do modelo, surgida durante o processo de desenvolvimento do produto, poderá ser satisfeita através do estabelecimento de zonas de tolerância assimétricas em relação ao perfil nominal, em vez de se proceder à redefinição das correspondentes dimensões nominais [H1].

#### 4) Componentes de especificação de uma restrição (coluna 4 da figura 7.22)

Se for admissível que a zona de tolerância possa estar deslocada de um valor constante, mas não especificado, em vez de ser simétrica em relação ao elemento teoricamente exato (TEF), tal deve ser indicado através da inscrição do **símbolo OZ** ("offset zone"), ver figura 7.32.



Legenda:

- 1 – Elemento teoricamente exato (TEF) complexo e único
- 2 – Duas esferas ou círculos do número infinito que define o elemento de deslocamento ("offset") teórico
- 3 – Elemento de deslocamento ("offset") teórico equidistante do elemento teoricamente exato (TEF)
- 4 – Limites da zona de tolerância
- 5 – Três esferas ou círculos do número infinito que define a zona de tolerância ao longo do elemento de deslocamento ("offset") teórico
- r – Deslocamento ("offset") constante, mas não especificado

Figura 7.32 – Zona de tolerância assimétrica com deslocamento ("offset") não especificado (ISO/DIS 1101.2)

Atendendo a que o deslocamento ("offset") não está constrangido a quaisquer limites, uma tolerância com o modificador **OZ** é geralmente combinada com uma tolerância mais larga, sem esse modificador. Deste modo, a zona de tolerância do "offset" controla a forma do elemento tolerenciado, no interior da zona de tolerância fixa mais alargada.

Muitas vezes, em superfícies planas e linhas retas, é possível utilizar, p. ex., uma tolerância de paralelismo, em vez de uma tolerância de localização, para se obter o mesmo efeito derivado da utilização do modificador **OZ**.

Por sua vez, o **modificador VA** deve ser inscrito no indicador de tolerância quando se admite que a zona de tolerância de um elemento de tamanho angular possa ter um deslocamento (“offset”) angular constante, mas não especificado, em relação ao elemento teoricamente exato (TEF). Na figura 7.33, apresenta-se um exemplo de toleranciamento de um cone, relativo à forma da sua superfície e sem a consideração do ângulo do cone (ilustração da proximidade com uma forma cônica perfeita, sem ter em conta um ângulo de cone predefinido).

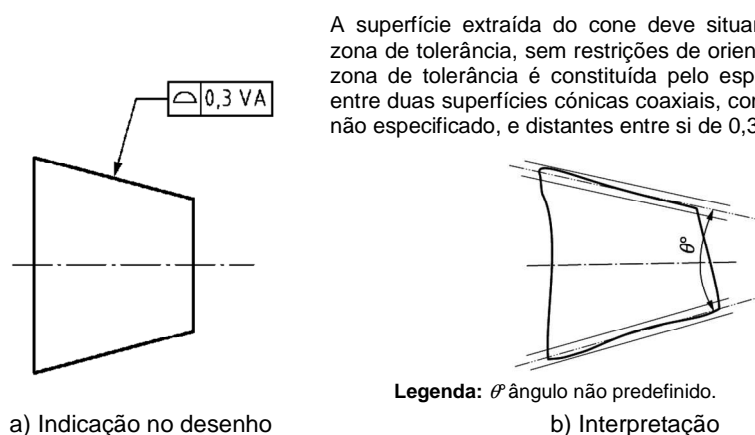


Figura 7.33 – Exemplo de especificação de uma superfície cônica cujo o tamanho é considerado variável.  
Adaptada da ISO 3040:2016

Este tipo de especificação combina dois requisitos: uma qualquer retitude das geratrizes e uma qualquer circularidade das diretrizes.

Finalmente, em relação ao **símbolo “><”** (apenas orientação), este deve ser inscrito no indicador de tolerância quando a translação da zona de tolerância não está bloqueada, isto é, apenas são restringidos os graus de liberdade de rotação da zona de tolerância [ver exemplo na figura 7.27 f)] que, caso contrário, teria os seus graus de liberdade de translação restringidos através de referências especificadas, em conformidade com a norma ISO 5459. Muitas vezes, em superfícies planas e linhas retas, é possível utilizar, p. ex., uma tolerância de paralelismo, em vez de uma tolerância de localização, para se obter o mesmo efeito derivado da utilização do modificador “apenas orientação”.

O símbolo “apenas orientação” permite que a zona de tolerância possa sofrer uma translação sem ser transformada, como acontece com a utilização do modificador **OZ** (o raio interno torna-se mais pequeno e o raio externo fica maior). Esta diferença é importante para linhas não retilíneas e superfícies não planas e para os elementos de tamanho. Para linhas retilíneas e superfícies planas, os modificadores **OZ** e “><” produzem o mesmo efeito.

#### 7.4.1.2.2 Componentes de especificação de um elemento toleranciado

##### 1) Componentes de especificação de filtros (colunas 5a e 5b da figura 7.22)

Todos os termos relacionados com a filtragem encontram-se definidos na norma ISO 16610-1. Os vários filtros específicos estão definidos nas outras partes da série ISO 16610.

Atualmente, não existem quaisquer especificações de filtragem, por omissão, definidas nas normas GPS. Consequentemente, a filtragem não fica definida, se não for indicada explicitamente através da utilização destes componentes de especificação ou de outros meios (ver secção 7.9.1). Este facto acrescenta uma ambiguidade de especificação, ver a norma ISO 17450-2 e a secção 4.8.1.1 deste trabalho.

A indicação de um filtro é um componente de especificação opcional. A filtragem especificada para o elemento toleranciado deve ser indicada através de uma combinação de dois componentes. Um assinala o **tipo de filtro** especificado e o outro indica o **índice ou índices de imbricação** [*"nesting index"* (en) ou *"indice d'imbrication"* (fr)] para o filtro.

Os símbolos utilizados para designar os filtros normalizados estão indicados no quadro 7.5. Para mais detalhes sobre o efeito da aplicação de filtros, ver a secção 7.9.3.

Quadro 7.5 – Símbolos dos filtros normalizados (ISO/DIS 1101.2)

Símbolo	Designação(ões)	Nome do filtro	Documento(s)
G	FPLG, FALG	Gaussiano	ISO 16610-21 ISO 16610-61
S	FPLS, FALS	Spline	ISO 16610-22, -62
SW	FPLSW, FALSW	Onduleta spline ( <i>"Spline Wavelet"</i> )	ISO 16610-29, -69
CW	FPLCW, FALCW	Onduleta complexa ( <i>"Complex Wavelet"</i> )	ISO 16610-29, -69
RG	FPRG, FARG	Gaussiano robusto ( <i>"Robust Gaussian"</i> )	ISO/TS 16610-31, -71
RS	FPRS, FARS	Spline robusto ( <i>"Robust Spline"</i> )	ISO/TS 16610-32, -72
OB	FAMOB	Esfera de abertura ( <i>"Opening Ball"</i> )	ISO/TS 16610-81
OH	FPMOH, FAMOH	Segmento horizontal de abertura ( <i>"Opening Horizontal Segment"</i> )	ISO 16610-41, -81
OD	FPMOD	Disco de abertura ( <i>"Opening Disc"</i> )	ISO 16610-41
CB	FAMCB	Esfera de fecho ( <i>"Closing Ball"</i> )	ISO/TS 16610-81
CH	FPMCH, FAMCH	Segmento horizontal de fecho ( <i>"Closing Horizontal Segment"</i> )	ISO 16610-41, -81
CD	FPMCD	Disco de fecho ( <i>"Closing Disc"</i> )	ISO 16610-41
AB	FAMAB	Esfera alternada ( <i>"Alternating Ball"</i> )	ISO/TS 16610-89
AH	FMAH, FMAH	Segmento horizontal alternado ( <i>"Alternating Segment"</i> )	ISO 16610-49, -89
AD	FPMAD	Disco alternado ( <i>"Alternating Disc"</i> )	ISO 16610-49
F		Fourier (harmónicos)	Não disponível
H		Envolvente ( <i>"Hull"</i> )	Não disponível
<b>Regras de base para a designação de filtros</b> <b>Filtro:</b> F = Filtro			
<b>Tipo:</b> A = Superfície ( <i>"Areal"</i> ) (3D) P = Perfil (2D)			
<b>Categoria:</b> L = Linear M = Morfológico R = Robusto			



O **índice de imbricação** (*"nesting index"*) é o valor que indica o nível relativo da hierarquia de imbricação, para um "modelo matemático primário" particular (ISO 16610-1). Este modelo é um conjunto de representações matemáticas imbricadas da porção de superfície, em que cada representação, neste conjunto, pode ser descrita por um número finito de parâmetros.

Para um dado índice de imbricação, os modelos com índices mais baixos contêm mais informação sobre a superfície, enquanto os modelos com índices de imbricação mais elevados contêm menos informação. O comprimento de onda de corte do filtro gaussiano é um exemplo de um índice de imbricação. No caso de um filtro morfológico, este índice corresponde ao tamanho do elemento estruturante (p. ex. o raio do disco), que difere do conceito de comprimento de onda subjacente ao termo "corte". Os índices de imbricação e o seu significado para cada tipo de filtro estão indicados no quadro 7.6.

Quadro 7.6 – Índices de imbricação (*"nesting indices"*) (ISO/DIS 1101.2)

Símbolo	Nome do filtro	Tipo de índice de imbricação
G	Gaussiano	Comprimento de corte UPR (ondulações por rotação) de corte
S	Spline	Comprimento de corte UPR (ondulações por rotação) de corte
SW	Onduleta spline ( <i>"Spline Wavelet"</i> )	Comprimento de corte UPR (ondulações por rotação) de corte
CW	Onduleta complexa ( <i>"Complex Wavelet"</i> )	Comprimento de corte UPR (ondulações por rotação) de corte
RG	Gaussiano robusto ( <i>"Robust Gaussian"</i> )	Comprimento de corte UPR (ondulações por rotação) de corte
RS	Spline robusto ( <i>"Robust Spline"</i> )	Comprimento de corte UPR (ondulações por rotação) de corte
OB	Esfera de abertura ( <i>"Opening Ball"</i> )	Raio da esfera
OH	Segmento horizontal de abertura ( <i>"Opening Horizontal segment"</i> )	Comprimento do segmento
OD	Disco de abertura ( <i>"Opening Disc"</i> )	Raio do disco
CB	Esfera de fecho ( <i>"Closing Ball"</i> )	Raio da esfera
CH	Segmento horizontal de fecho ( <i>"Closing Horizontal segment"</i> )	Comprimento do segmento
CD	Disco de fecho ( <i>"Closing Disc"</i> )	Raio do disco
AB	Esfera alternada ( <i>"Alternating Ball"</i> )	Raio da esfera
AH	Segmento horizontal alternado ( <i>"Alternating Horizontal segment"</i> )	Comprimento do segmento
AD	Disco alternado ( <i>"Alternating Disc"</i> )	Raio do disco
F	Fourier (harmónicos)	Comprimento de onda Nº de ondulações por rotação (UPR)
H	Envolvente ( <i>"Hull"</i> )	H0 indica a envolvente convexa
O comprimento de corte ( <i>"Cutoff length"</i> ) aplica-se a filtros para perfis abertos. As UPR (ondulações por rotação) de corte [ <i>"Cutoff UPR (undulations per revolution)"</i> ] aplicam-se a filtros para perfis fechados.		

Para um filtro que deixa passar as baixas frequências (**filtro passa-baixo**), isto é, que deixa passar os comprimentos de onda longos (*"long wave pass filter"*), o índice deve ser seguido por um sinal "-" [ver exemplo na figura 7.34 a)]. Para um filtro que deixa passar as altas frequências (**filtro passa-alto**), isto é, que deixa passar os comprimentos de onda curtos (*"short wave pass filter"*), o índice deve ser antecedido por um sinal "-" [ver exemplo na figura 7.34 b)]. Para um **filtro passa-banda** que utiliza o mesmo tipo de filtro para ambos os limites, o índice do filtro passa-baixo deve ser indicado em primeiro lugar e o índice do filtro passa-alto deve ser dado em segundo. Os dois índices devem ser separados por um sinal "-" [ver exemplo na figura 7.34 c)].

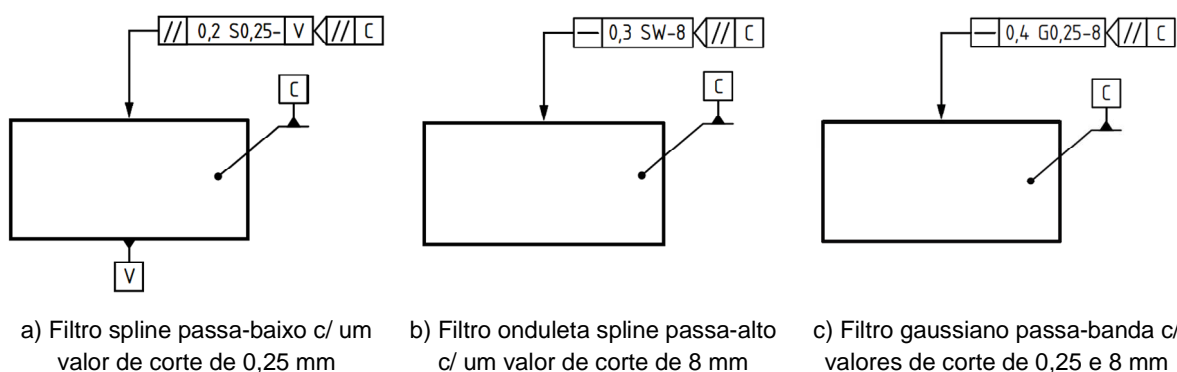


Figura 7.34 – Exemplos de especificações de tolerâncias geométricas com a indicação do tipo de filtro e do índice de imbricação. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Deve registrar-se que, nos exemplos apresentados na figura 7.34, as tolerâncias aplicam-se a cada um dos elementos de linha, das superfícies assinaladas, paralelos ao plano de referência C, especificado pelo indicador de plano de interseção, representado do lado direito do indicador de tolerância (ver secção 7.4.2.1).

No caso dos filtros de Fourier, assinalados pelo componente de especificação F (Fourier), quando a especificação se aplica a um único harmónico, deve indicar-se apenas um valor (comprimento de onda ou número de ondulações por revolução – UPR). Na figura 7.35, como o elemento toleranciado é fechado (uma circunferência), o valor 7 significa que a especificação se refere ao 7º harmónico do elemento, com a frequência de 7 UPR. Se a especificação se aplicar a um elemento filtrado englobando um intervalo de harmónicos, a indicação deve seguir as regras atrás mencionadas.

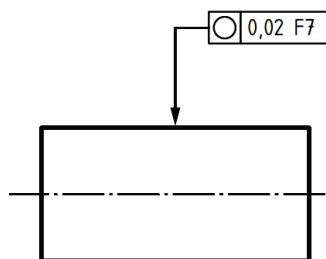


Figura 7.35 – Exemplo de especificação de uma tolerância de circularidade considerando apenas o 7º harmónico do elemento, filtrado através de um filtro de Fourier (ISO/DIS 1101.2)

Para os filtros passa-banda que utilizam diferentes tipos de filtros, o filtro passa-baixo deve ser indicado antes do filtro passa-alto. No exemplo apresentado na figura 7.36, o filtro passa-banda é constituído por um filtro spline passa-baixo, com um valor de corte de 0,08 mm, e por um filtro por onduleta complexa passa-alto, com um valor de corte de 2,5 mm. No operador de especificação para filtros passa-banda, o filtro passa-baixo deve ser aplicado antes do filtro passa-alto.

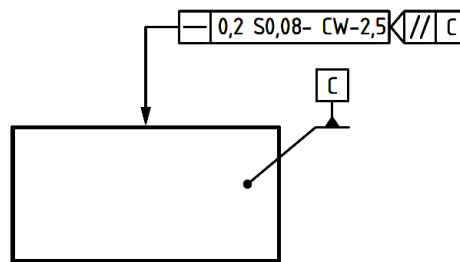
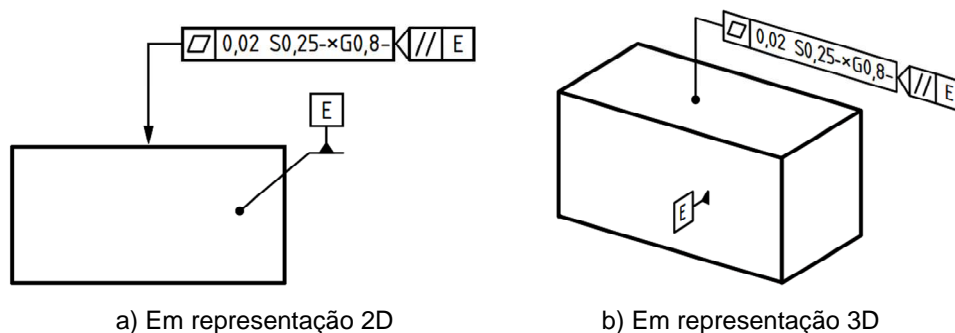


Figura 7.36 – Exemplo de especificação de uma tolerância de retitude com um filtro passa-banda que utiliza dois tipos de filtro diferentes (ISO/DIS 1101.2)

**Os filtros passa-alto e os filtros passa-banda só devem ser utilizados em especificações de características de forma**, isto é, em especificações que não estão relacionadas com referências especificadas, uma vez que removem os atributos de posição e orientação do elemento toleranciado (ISO/DIS 1101.2).

Para os **elementos abertos**, por exemplo linhas retas, planos e cilindros na direção axial, o índice de imbricação deve ser indicado em mm. Para **elementos fechados**, por exemplo cilindros na direção circunferencial, toros e esferas, o índice de imbricação deve ser indicado em UPR (ondulações por rotação), ver exemplos nas figuras 7.34 e 7.35.

Se num elemento que é aberto em ambas as direções, p. ex. um plano, for utilizado **um filtro diferente em cada uma das direções**, deve recorrer-se a um indicador de plano de interseção para estabelecer a direção em que deve ser aplicado o primeiro filtro indicado. O sinal "x" deve ser utilizado para separar as indicações dos dois filtros. O segundo filtro indicado deve ser aplicado na direção perpendicular à direção do primeiro filtro (ver exemplo na figura 7.37).



a) Em representação 2D

b) Em representação 3D

Figura 7.37 – Exemplo de especificação de uma tolerância de planeza com a utilização de dois filtros diferentes nas duas direções (ISO/DIS 1101.2)

Para um elemento que é aberto numa direção e fechado noutra, p. ex. um cilindro, o filtro para a direção aberta deve ser indicado antes do filtro para a direção fechada. O sinal "×" deve ser utilizado para separar as indicações dos dois filtros (ver exemplo na figura 7.38).

Se ambos os filtros forem do mesmo tipo, independentemente do facto das duas direções serem ambas abertas (p. ex. um plano), ambas fechadas (p. ex. uma esfera), ou uma de cada (p. ex. um cilindro), o tipo de filtro deve ser indicado apenas uma vez (ver exemplo na figura 7.38).

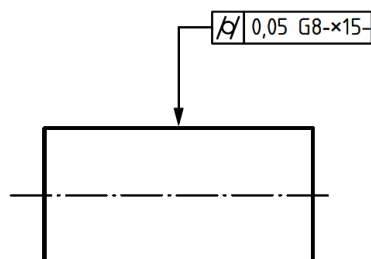


Figura 7.38 – Exemplo de especificação de uma tolerância de cilindridade com a indicação de filtros do mesmo tipo para as direções aberta e fechada (ISO/DIS 1101.2)

Quando o elemento tolerenciado é um elemento derivado ou um elemento associado, a filtragem deve ser aplicada ao elemento integral antes da operação de derivação ou de associação.

## 2) Componente de especificação de elemento associado tolerenciado (coluna 6 da figura 7.22)

Por omissão, uma especificação aplica-se ao elemento real extraído indicado, integral ou derivado. O componente de especificação de um elemento associado tolerenciado é um componente de especificação opcional. Deve ser utilizado para assinalar que a especificação não se aplica ao elemento indicado, mas sim ao elemento com ele associado. Se tiver sido indicado um filtro, a associação deve ser realizada com o elemento filtrado.

O componente de especificação de um elemento associado tolerenciado deve ser utilizado apenas para tolerâncias relacionadas com referências especificadas ("*datums*"), isto é, tolerâncias de orientação e de posição.

Se o componente de especificação de um elemento associado tolerenciado for utilizado em conjunto com um componente de especificação de um filtro, a associação deve ser realizada com o elemento filtrado, na sua qualidade de elemento não ideal.

Quando o elemento tolerenciado é um elemento derivado, o elemento associado deve ser o elemento indiretamente associado, ver a secção 4.3.1 deste texto e a norma ISO 22432. A extensão do elemento associado tolerenciado deve ser igual à extensão do elemento com o qual ele está associado.

O componente de especificação de elemento associado tolerenciado não deve ser utilizado em conjunto com um componente de especificação do método de associação do elemento de referência

("reference feature") [ver o ponto 1, da secção 7.4.1.2.3, deste texto], com um componente de especificação do parâmetro de avaliação de desvios geométricos de forma [ver o ponto 2, da secção 7.4.1.2.3, deste texto], ou com um componente especificação da condição de matéria [ver a secção 7.4.1.2.4 e o capítulo 8 deste texto e a norma ISO 2692].

Estão previstos os seguintes componentes de especificação de um elemento associado toleranciado:

**Símbolo modificador**  $\textcircled{C}$  – utilizado para indicar que o elemento toleranciado é o elemento associado minimax (Chebyshev), sem qualquer restrição em relação à matéria. Este componente de especificação pode ser utilizado com elementos que são nominalmente linhas retas, planos, circunferências, cilindros, cones e toros. Na figura 7.39, apresenta-se um exemplo de aplicação de uma tolerância de localização ao elemento associado minimax que, neste caso, é uma superfície.

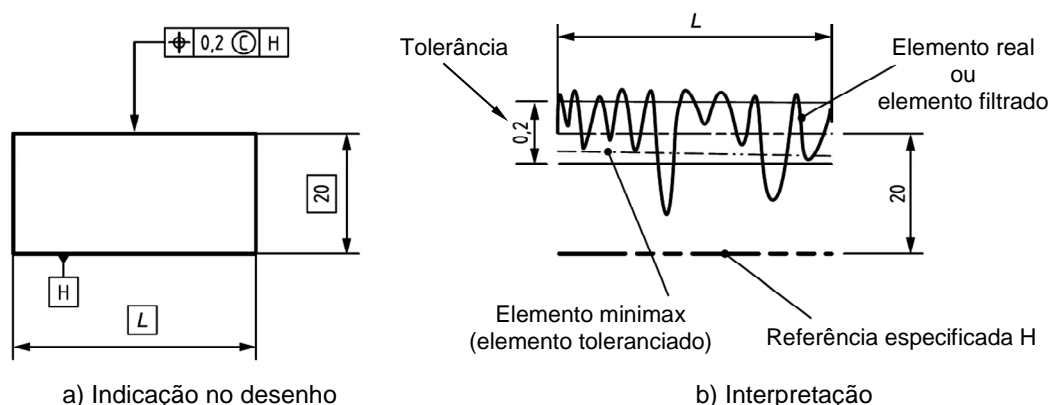


Figura 7.39 – Exemplo de aplicação de uma tolerância de localização ao elemento associado minimax. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

**Símbolo modificador**  $\textcircled{G}$  – utilizado para indicar que o elemento toleranciado é o elemento associado dos mínimos quadrados (Gauss), sem qualquer restrição em relação à matéria. Este componente de especificação pode ser utilizado com elementos que são nominalmente linhas retas, planos, circunferências, cilindros, cones e toros. Na figura 7.40, apresenta-se um exemplo de aplicação de uma tolerância de localização ao elemento associado dos mínimos quadrados que, neste caso, é uma superfície.

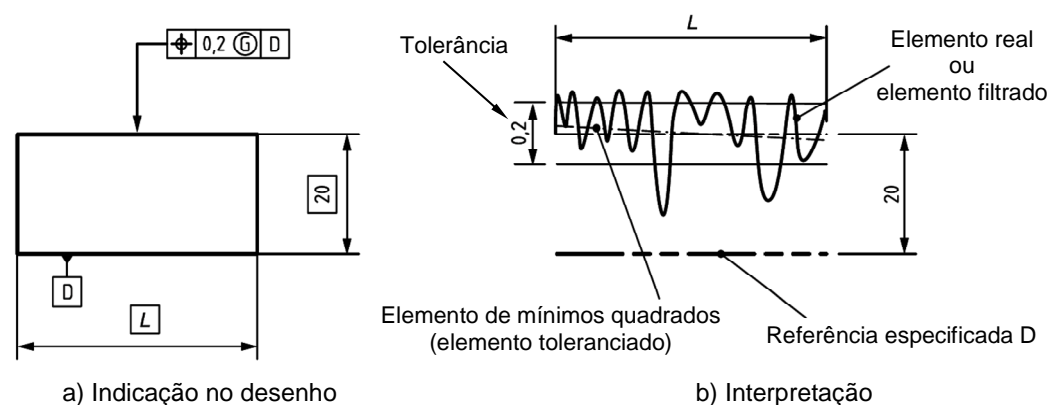


Figura 7.40 – Exemplo de aplicação de uma tolerância de localização ao elemento associado dos mínimos quadrados. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

**Símbolo modificador** (N) – utilizado para indicar que o elemento toleranciado é o elemento associado mínimo circunscrito. Esta associação minimiza o tamanho do elemento associado com a restrição de este circunscrever o elemento não ideal. Este componente de especificação só pode ser utilizado com elementos de tamanho linear. Na figura 7.41, apresenta-se um exemplo de aplicação de uma tolerância de localização ao elemento associado mínimo circunscrito que, neste caso, é uma linha reta (o eixo do elemento associado).

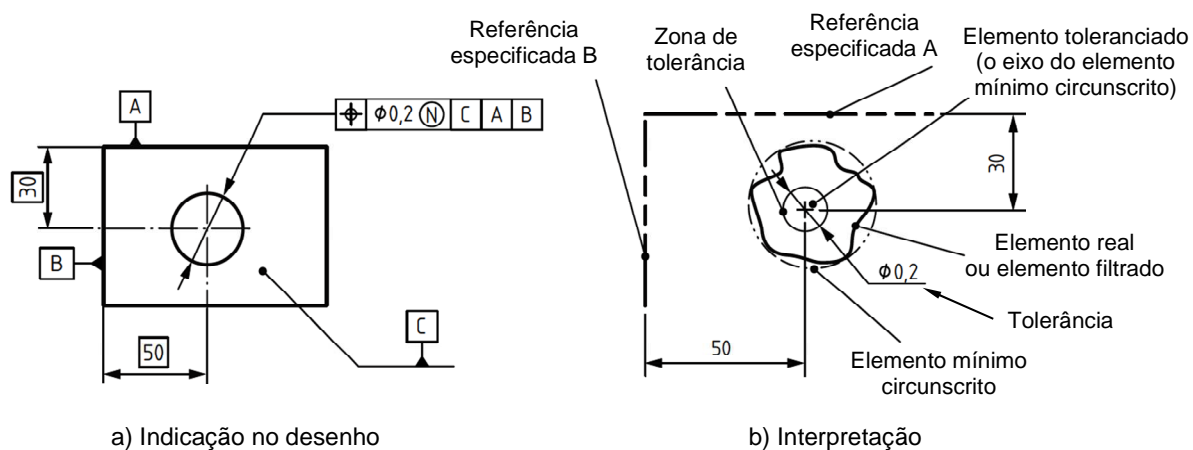


Figura 7.41 – Exemplo de aplicação de uma tolerância de localização ao elemento associado mínimo circunscrito. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

**Símbolo modificador** (T) – utilizado para indicar que o elemento toleranciado é o elemento associado tangente, baseado na norma  $L_1$  (função objetivo para a associação baseada na minimização da soma das distâncias absolutas entre o elemento toleranciado e o elemento real, ver a secção 7.9.4.2.1), com a restrição de ser exterior à matéria do elemento não ideal. Este componente de especificação pode ser utilizado apenas com elementos que são nominalmente linhas retas e planos. Conforme aplicável, o elemento toleranciado é a linha reta ou o plano tangente ao elemento indicado. Na figura 7.42, apresenta-se um exemplo de aplicação de uma tolerância de paralelismo ao elemento associado tangente que, neste caso, é uma superfície.

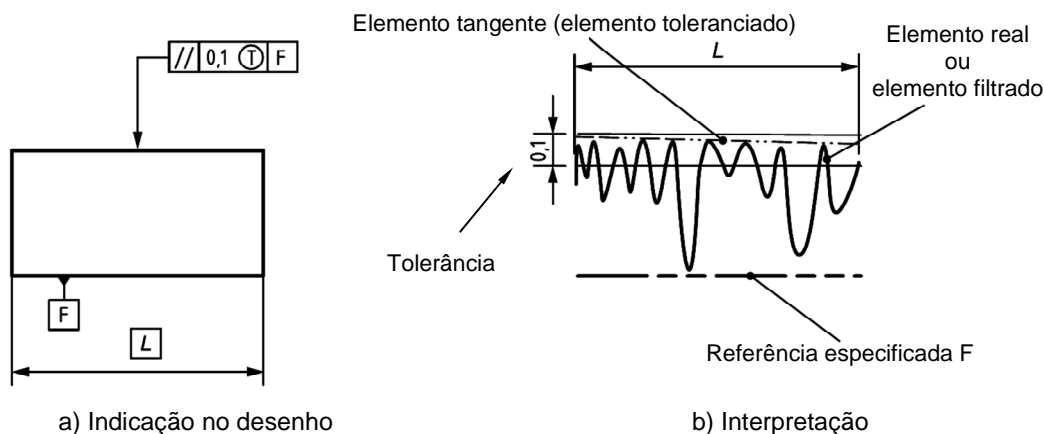


Figura 7.42 – Exemplo de aplicação de uma tolerância de paralelismo ao elemento associado tangente. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

**Símbolo modificador**  $\textcircled{X}$  – utilizado para indicar que o elemento toleranciado é o elemento associado máximo inscrito. Esta associação maximiza o tamanho do elemento associado com a restrição de este estar inscrito no elemento não ideal. Este componente de especificação só pode ser utilizado com elementos de tamanho linear. Na figura 7.43, apresenta-se um exemplo de aplicação de uma tolerância de localização ao elemento associado máximo inscrito que, neste caso, é uma linha reta (o eixo do elemento associado).

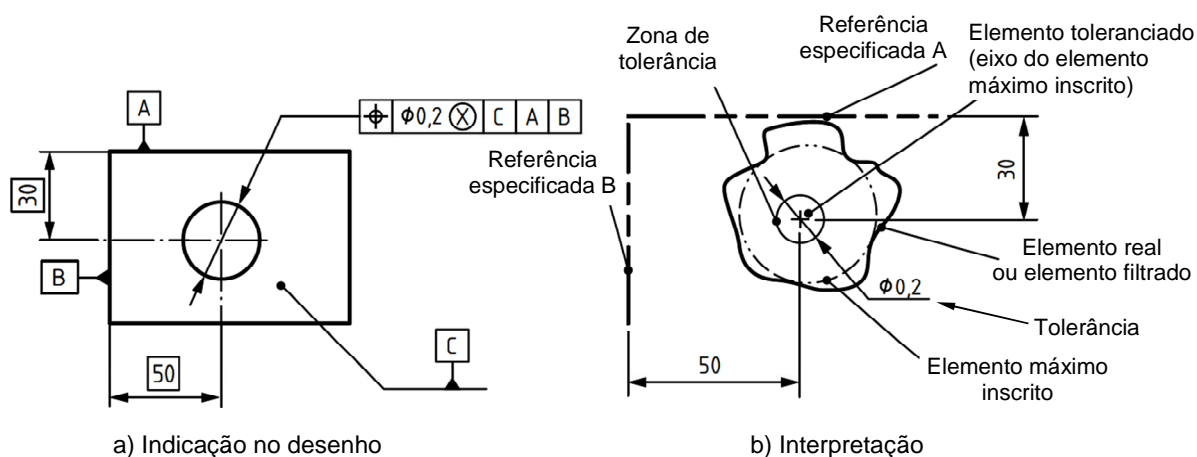


Figura 7.43 – Exemplo de aplicação de uma tolerância de localização ao elemento associado máximo inscrito. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

### 3) Componente de especificação de elemento derivado toleranciado (coluna 7 da figura 7.22)

Por omissão, a especificação aplica-se ao próprio elemento assinalado, salvo indicação em contrário, em conformidade com a secção 7.3.3. O componente de especificação de **elemento derivado** toleranciado é um componente opcional. É utilizado para indicar que a especificação não se aplica ao próprio elemento integral, mas a um elemento dele derivado.

Estão disponíveis os seguintes componentes de especificação de elemento derivado toleranciado:

**Símbolo modificador**  $\textcircled{A}$  – é utilizado para indicar que o elemento toleranciado é o elemento derivado. Por conseguinte, este componente de especificação só pode ser utilizado com elementos de tamanho. Uma vez que a indicação seria ambígua, se o elemento de tamanho fosse composto por dois elementos, p. ex. dois planos paralelos e opostos, esta especificação só pode ser utilizada com elementos de revolução (ver figura 7.13). O elemento derivado é a linha mediana, se o elemento indicado for um cilindro, ou o ponto mediano, se o elemento indicado for uma circunferência ou uma esfera.

**Símbolo modificador**  $\textcircled{P}$  – é utilizado para indicar que a zona de tolerância se aplica a um elemento prolongado (elemento toleranciado projetado), ver secção 7.7.

#### 7.4.1.2.3 Componentes de especificação de característica geométrica de forma

##### 1) Componente de especificação do método de associação do elemento de referência (coluna 8 da figura 7.22)

Um **elemento de referência** (*“reference feature”*) é um elemento associado que se ajusta ao elemento geométrico extraído e filtrado, em conformidade com convenções específicas, ao qual são referidos os desvios geométricos de forma e os parâmetros de avaliação correspondentes [ver exemplos nas normas ISO 12180-1 (*“cilindro de referência”*), ISO 12181-1 (*“circunferência de referência”*), ISO 12780-1 (*“linha de referência”*) e ISO 12781-1 (*“plano de referência”*) e a seção 7.9.4 deste texto].

Por omissão, o método de associação do elemento de referência é a associação minimax (Chebyshev ou Tchebychev), sem quaisquer restrições (ISO/DIS 1101.2). O componente de especificação do método de associação do elemento de referência é um componente opcional. Apenas pode ser utilizado para especificações de características de forma, isto é, especificações não relacionadas com referências especificadas.

Está prevista a possibilidade de indicação dos seguintes componentes de especificação:

**Símbolo modificador C** – deve ser utilizado para indicar o método de associação minimax (Chebyshev). Este método minimiza a distância entre o ponto mais afastado pertencente ao elemento toleranciado e o elemento de referência, ver figura 7.44 a).

**Símbolo modificador CE** – deve ser utilizado para indicar o método de associação minimax (Chebyshev) com a restrição do elemento associado ser exterior à matéria. Este método minimiza a distância entre o ponto mais afastado pertencente ao elemento toleranciado e o elemento de referência, mantendo este último elemento exterior à matéria, ver Figura 44 b).

**Símbolo modificador CI** – deve ser utilizado para indicar o método de associação minimax (Chebyshev) com a restrição do elemento associado ser interior à matéria. Este método minimiza a distância entre o ponto mais afastado pertencente ao elemento toleranciado e o elemento de referência, mantendo este último elemento interior à matéria, ver figura 44 c).

**Símbolo modificador G** – deve ser utilizado para indicar o método de associação dos mínimos quadrados (Gauss). Este método minimiza a soma dos quadrados dos desvios locais do elemento toleranciado em relação ao elemento de referência.

**Símbolo modificador GE** – deve ser utilizado para indicar o método de associação dos mínimos quadrados (Gauss) com a restrição do elemento associado ser exterior à matéria. Este método minimiza a soma dos quadrados dos desvios locais do elemento toleranciado em relação ao elemento de referência, mantendo este último elemento exterior à matéria.

**Símbolo modificador GI** – deve ser utilizado para indicar o método de associação dos mínimos quadrados (Gauss) com a restrição do elemento associado ser interior à matéria. Este método



minimiza a soma dos quadrados dos desvios locais do elemento tolerenciado em relação ao elemento de referência, mantendo este último elemento interior à matéria.

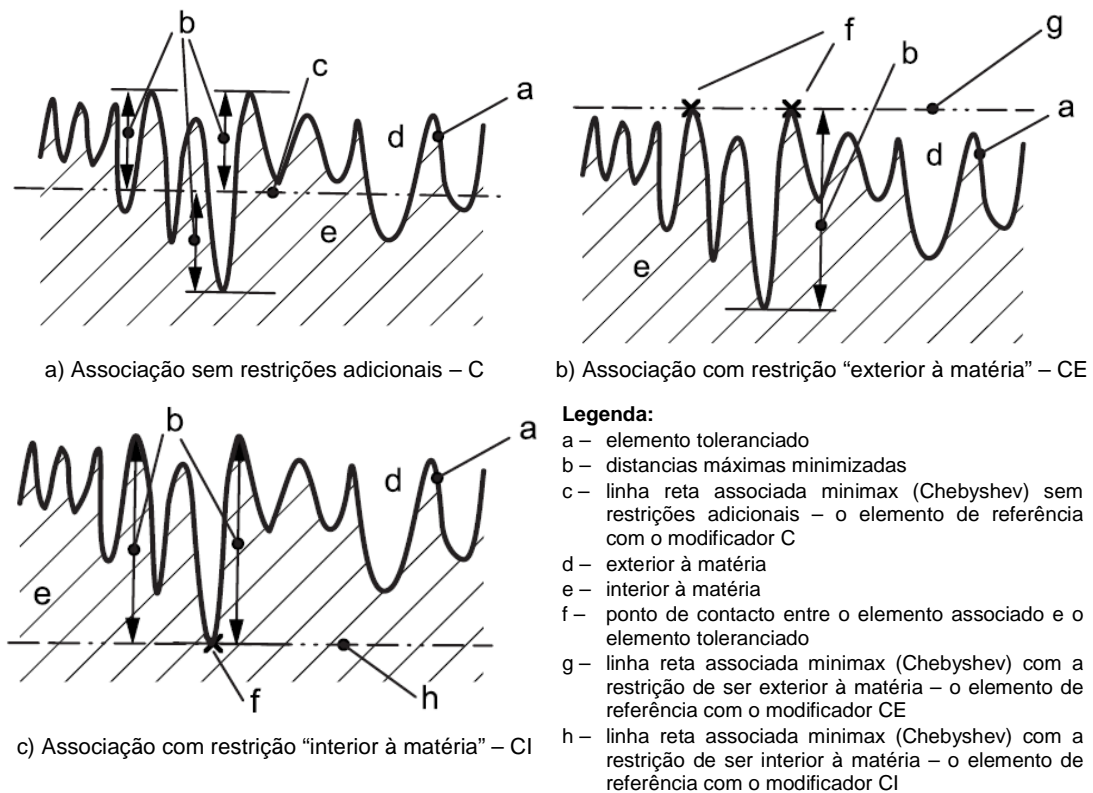


Figura 7.44 – Associações minimax (Chebyshev). Adaptada do ISO/DIS 1101.2

As associações dos mínimos quadrados (Gauss) são semelhantes às associações minimax (Chebyshev), representadas na figura 7.44, salvo o facto de aquilo que é minimizado não ser a distância máxima em relação ao elemento associado, mas sim a raiz quadrada da soma dos quadrados dos desvios locais entre o elemento tolerenciado e o elemento associado (ISO/DIS 1101.2).

**Símbolo modificador X** – deve ser utilizado para indicar o método de associação do máximo inscrito. Só aplicável a elementos de tamanho linear toleranciados. Este método de associação maximiza o tamanho do elemento de referência, ao mesmo tempo que este se mantém totalmente no interior do elemento tolerenciado, ver figura 7.45.

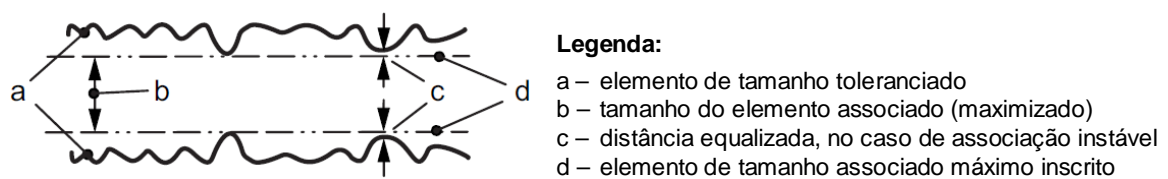


Figura 7.45 – Método de associação do máximo inscrito. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

**Símbolo modificador N** – deve ser utilizado para indicar o método de associação do mínimo circunscrito. Só aplicável a elementos de tamanho linear toleranciados. Este método de associação

minimiza o tamanho do elemento de referência, ao mesmo tempo que este se mantém totalmente no exterior do elemento toleranciado, ver figura 7.46.

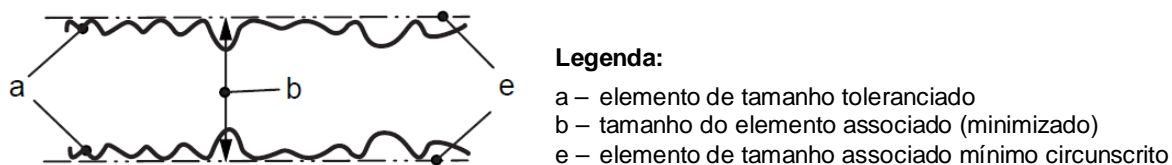


Figura 7.46 – Método de associação do mínimo circunscrito. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Os métodos de associação do máximo inscrito e do mínimo circunscrito só se aplicam a elementos cilíndricos e esféricos, para características geométricas de forma (ISO/DIS 1101.2), e a elementos de tamanho (esfera, dois planos paralelos opostos, cilindro e toro), para referências especificadas (ISO 5459).

Na figura 7.47 a), apresenta-se um exemplo de uma especificação de retitude aplicada em relação ao elemento referência dos mínimos quadrados (Gauss). O indicador do plano de interseção estabelece que a direção das linhas toleranciadas é paralela à referência especificada C.

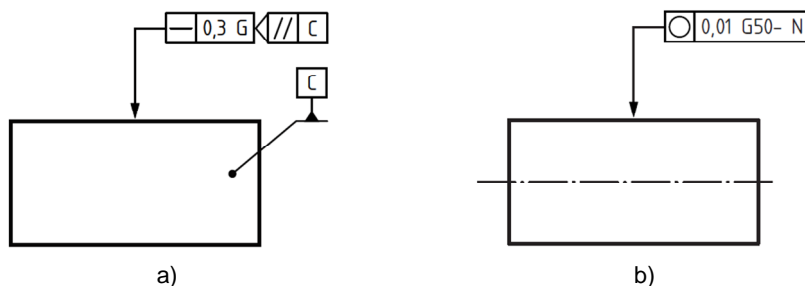


Figura 7.47 – Exemplos de especificações da associação do elemento de referência. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Na figura 7.47 b), pode observar-se um exemplo de uma especificação de circularidade estabelecida em relação ao elemento referência do mínimo circunscrito, após a aplicação de um filtro gaussiano passa-baixo, com um valor de corte de 50 UPR.

## 2) Componente de especificação do parâmetro de avaliação de desvios geométricos de forma (coluna 9 da figura 7.22)

O parâmetro de avaliação, por omissão, que se aplica quando não é indicado explicitamente qualquer componente de especificação, é a **amplitude total dos desvios** (ISO/DIS 1101.2) ou desvio de pico-a-vale (ver normas ISO 12180-1, ISO 12181-1, ISO 12780-1 e ISO 12781-1), isto é, a distância desde o vale mais fundo no elemento toleranciado até ao elemento de referência, mais a distância desde o pico mais alto do elemento toleranciado até ao elemento de referência. O componente de especificação do parâmetro é um componente opcional. Apenas pode ser utilizado para especificações de forma, isto é, especificações não relacionadas com referências especificadas.

Está prevista a possibilidade de indicação dos seguintes componentes de especificação do parâmetro de avaliação de desvios geométricos de forma (ver figura 7.48):

**Símbolo modificador T** – poderá ser utilizado para indicar a **amplitude total dos desvios**, que é também o parâmetro por omissão.

**Símbolo modificador P** – deve ser utilizado para indicar a **altura de pico**, que é definida como a distância desde o pico mais alto do elemento toleranciado até ao elemento de referência. A altura de pico é definida apenas em relação à associação minimax (Chebyshev) e à associação dos mínimos quadrados (Gauss), indicadas respetivamente pelos componentes de especificação **C** e **G** dos métodos de associação (ISO/DIS 1101.2).

**Símbolo modificador V** – deve ser utilizado para indicar a **profundidade do vale**, isto é, a distância desde o vale mais fundo do elemento toleranciado até ao elemento de referência. A profundidade do vale é definida apenas em relação à associação minimax (Chebyshev) e à associação dos mínimos quadrados (Gauss), indicadas respetivamente pelos componentes de especificação **C** e **G** dos métodos de associação (ISO/DIS 1101.2).

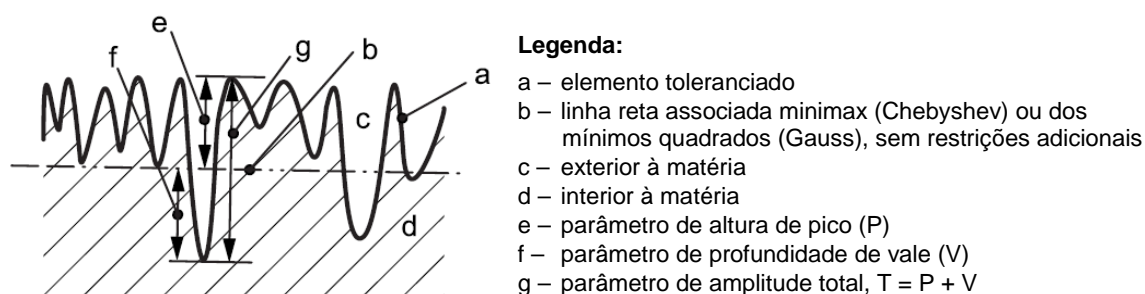


Figura 7.48 – Parâmetros de avaliação de desvios geométricos de forma. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

**Símbolo modificador Q** – deve ser utilizado para indicar a raiz quadrada da soma dos quadrados dos resíduos, o **desvio médio quadrático** ou desvio padrão do elemento toleranciado em relação ao elemento de referência.

$$Q = \left( \frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{para elementos lineares}$$

ou

$$Q = \left( \frac{1}{a} \int_0^a Z^2(x) dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{para elementos de superfície}$$

(7.1)

em que:

- Q – é o parâmetro de avaliação
- l – é o comprimento do elemento toleranciado
- a – é a área do elemento toleranciado
- $Z(x)$  – é a função do desvio local para o elemento toleranciado
- x – é a posição ao longo do elemento toleranciado

A origem de  $Z(x)$  é o elemento de referência, seja o elemento de referência por omissão [minimax (Chebyshev) sem qualquer restrição] seja o elemento de referência especificado em conformidade com o ponto 1, da secção 7.4.1.2.3, deste texto.

Na figura 7.49 a), apresenta-se um exemplo de uma especificação de circularidade aplicada à profundidade do vale em relação à circunferência de referência dos mínimos quadrados (Gauss).

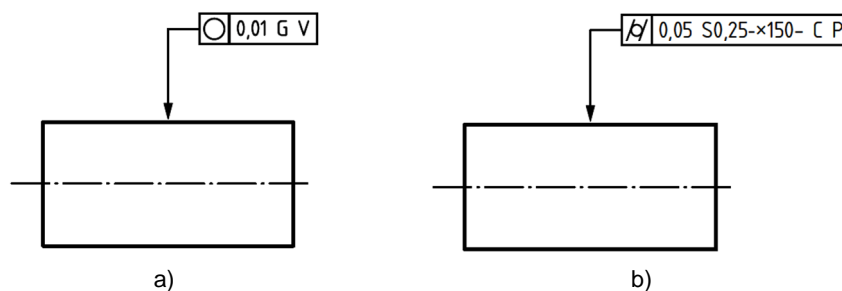


Figura 7.49 – Exemplos de especificações do parâmetro de avaliação de desvios geométricos de forma. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Na figura 7.49 b), pode observar-se um exemplo de uma especificação de cilindridade que se aplica à altura de pico em relação ao cilindro de referência minimax (Chebyshev), após a utilização de um filtro spline passa-baixo, com valores de corte de 0,25 mm, na direção axial, e de 150 UPR, na direção circunferencial.

#### 7.4.1.2.4 Componente de especificação da condição de matéria (coluna 10 da figura 7.22)

Os componentes de especificação do requisito de matéria, indicados por intermédio dos símbolos modificadores  $\textcircled{M}$ ,  $\textcircled{L}$  e  $\textcircled{R}$ , são opcionais, ver exemplos na figura 7.50. Estes requisitos, definidos na norma ISO 2692, só podem ser aplicados a elementos de tamanho e são utilizados para controlar funções específicas de peças em que tamanho e geometria são interdependentes. O requisito de máximo de matéria  $\textcircled{M}$  abrange a “aptidão para a montagem de peças” e o requisito de mínimo de matéria  $\textcircled{L}$  cobre, p. ex., a “espessura mínima de parede”. Cada um destes requisitos combina dois requisitos independentes num requisito coletivo que simula, de um modo mais exato, a função pretendida para a peça. Em alguns casos, estes requisitos podem ser complementados pelo requisito de reciprocidade  $\textcircled{R}$ . Estes conceitos são objeto de um tratamento mais desenvolvido no capítulo 8 deste trabalho.

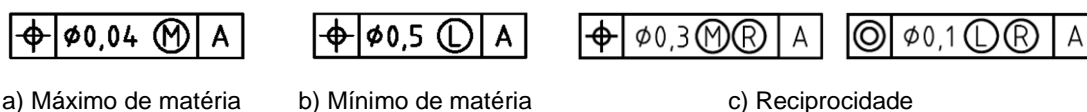


Figura 7.50 – Exemplos de especificação de requisitos de matéria

#### 7.4.1.2.5 Componente de especificação de estado (coluna 11 da figura 7.22)

O componente de especificação da **condição de estado livre** ("free state condition"), expresso pelo símbolo modificador **(F)**, é opcional, podendo ser utilizado em peças que são definidas como "**peças não rígidas**", tais como peças produzidas em chapa metálica fina, em borracha, em plástico, etc. (ver norma ISO 10579).

As peças deste tipo, quando retiradas do seu ambiente de fabricação, poderão deformar-se significativamente em relação aos seus limites definidos, devido ao seu peso, à sua flexibilidade ou à libertação de tensões internas resultantes dos processos de fabricação. No entanto, esta deformação é aceitável desde que as peças possam ser trazidas para dentro dos limites das tolerâncias especificadas, por aplicação de uma força razoável, de modo a facilitar a sua verificação e montagem.

Dependendo da função estabelecida na concepção e da interface da peça com os componentes conjugados, em vez de, ou em complemento a, avaliar a peça convencionalmente (na sua condição de estado livre), poderá ser necessário avaliar a peça quando sujeita a uma **restrição** não superior à aceitável, na sua condição de montagem.

É impossível evitar o efeito de forças naturais, tais como a gravidade; mas a amplitude da distorção poderá depender da orientação da peça e da sua condição no estado livre. Se for necessário indicar uma tolerância no estado livre, as condições sob as quais essa tolerância deve ser respeitada (isto é, o sentido da ação da gravidade, as condições em que a peça deve ser apoiada, etc.) poderão ter de ser indicadas numa nota, tal como se mostra no exemplo da figura 7.51 b).

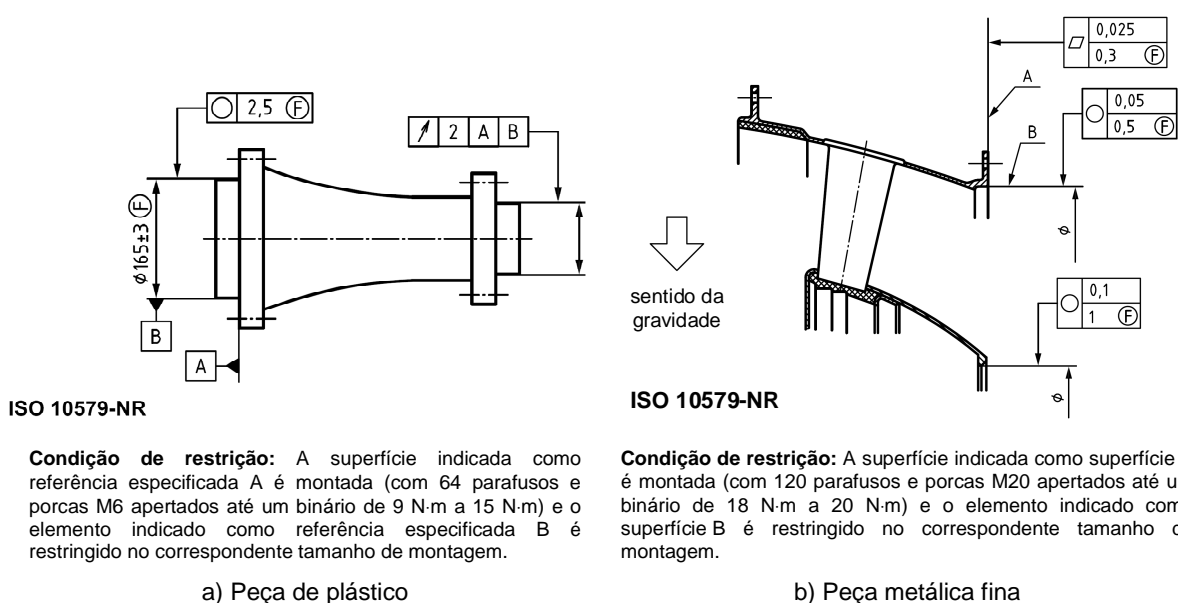


Figura 7.51 – Exemplos de especificação da condição de estado livre. Adaptada da ISO 10579

Para peças não rígidas, identificadas no desenho através da indicação “**ISO 10579-NR**” colocada no interior ou junto da legenda, aplica-se a **condição de restrição**, a menos que as dimensões e as tolerâncias geométricas sejam qualificadas pelo símbolo **F** (ver figura 7.51).

As tolerâncias geométricas e/ou dimensionais seguidas do símbolo modificador **F** devem ser asseguradas no estado livre. As outras aplicam-se sob as condições indicadas na nota.

#### 7.4.1.3 Secção de “referências especificadas”

As indicações sobre “referências especificadas e sistemas de referências especificadas” são englobadas na terceira secção do indicador de tolerância (ver figura 7.21), que é opcional e poderá ser constituída por um número de compartimentos que pode variar de um a três.

Uma **referência especificada** (“*datum*”) pode ser formada por um ou mais elementos de situação de um ou mais elementos associados a um ou mais elementos integrais reais, selecionados para definir a posição e/ou a orientação de uma zona de tolerância ou de um elemento ideal que representa, por exemplo, uma condição virtual (ver ISO 2692). As referências especificadas podem ser simples ou comuns e podem também ser consideradas em conjunto, de modo a constituírem sistemas de referências.

Uma **referência especificada simples** (“*single datum*”), estabelecida a partir de um elemento de referência considerado numa superfície simples ou num elemento de tamanho, é identificada, no indicador de tolerância, por uma letra maiúscula [ver figura 7.52 a)]. Uma **referência especificada comum** (“*common datum*”), formada a partir de dois ou mais elementos de referência considerados em simultâneo, é identificada, no indicador de tolerância, por duas letras maiúsculas separadas por um traço de união [ver figura 7.52 b)]. Se um **sistema de referências especificadas** (“*datum system*”) for constituído por um conjunto de dois ou mais elementos de situação estabelecidos, numa ordem específica, a partir de dois ou mais elementos de referência, as letras maiúsculas das referências especificadas são indicadas da esquerda para a direita, na ordem de prioridade dos elementos e em compartimentos diferentes do indicador de tolerância, [ver figura 7.52 c)].

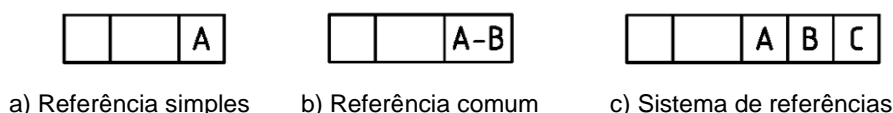


Figura 7.52 – Exemplos de indicações de referências e de sistemas de referências especificadas

O requisito de máximo de matéria **M** e o requisito de mínimo de matéria **L** (ver ISO 2692) podem também ser aplicados a referências especificadas, se estas forem obtidas a partir de elementos de tamanho, devendo os respetivos símbolos modificadores ser inscritos após a(s) letra(s) que designam a referência especificada, ver a figura 7.53 e o capítulo 8 deste trabalho.



Figura 7.53 – Exemplos de especificação de requisitos de matéria em referências especificadas

Na secção 7.8, abordam-se as regras e a metodologia para a indicação e compreensão das referências especificadas e sistemas de referências especificadas na documentação técnica de produtos, estabelecidas na norma ISO 5459.

## 7.4.2 Indicadores de elementos geométricos auxiliares

A necessidade de adaptação das indicações do toleranciamento geométrico à nova linguagem GPS, permitindo estender, às peças reais, geometricamente imperfeitas, a interpretação das especificações inscritas nos desenhos 2D em representação ortográfica (com um significado teoricamente exato) e possibilitando a sua utilização simultânea em anotações realizadas em vistas axonométricas 3D, elaboradas em desenhos 2D, e em modelos virtuais 3D, sobretudo quando o plano de projeção está implicado no significado das anotações 2D, tornou indispensável a utilização de diferentes indicadores de elementos geométricos auxiliares, colocados à direita do indicador de tolerância, em determinadas especificações geométricas.

### 7.4.2.1 Planos de interseção

Para identificar uma linha numa superfície extraída (integral ou mediana) ou um ponto numa linha extraída, pode ser necessário estabelecer um **plano de interseção**, a partir de um elemento extraído da peça. A sua utilização permite definir a orientação de elementos toleranciados independentemente das vistas da peça em desenho 2D, tais como: a retitude de uma linha num plano [ver figura 7.55 a)], o perfil de uma linha em secções de uma superfície [ver figuras 7.56 b) e d)], a orientação de um elemento de linha num elemento geométrico [ver figura 7.55 c)] e especificações “a toda a volta” para linhas em superfícies (ver figura 7.63).

Para o estabelecimento de uma família de planos de interseção, apenas podem ser utilizadas superfícies pertencentes a uma das seguintes classes de invariância: de revolução (p. ex. um cone ou um toro), cilíndrica (isto é, um cilindro) e plana (isto é, um plano). Um plano de interseção deve ser especificado através de um **indicador de plano de interseção**, colocado como uma extensão para a direita do indicador de tolerância (ver figuras 7.54 e 7.55), que define o modo de construção do plano de interseção, a partir da referência especificada inscrita no compartimento do lado direito.

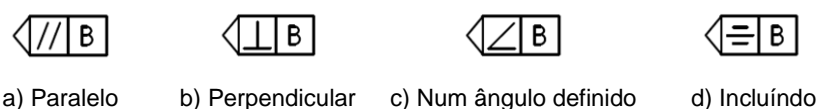


Figura 7.54 – Exemplos de indicadores de planos de interseção (ISO/DIS 1101.2)

Quando o elemento toleranciado corresponde a linhas de um elemento, numa dada direção, e o símbolo da tolerância não permite perceber se a indicação se refere a linhas ou a toda a superfície, esta distinção deve ser feita através da utilização de um plano de interseção [ver figuras 7.55 b) e c)].

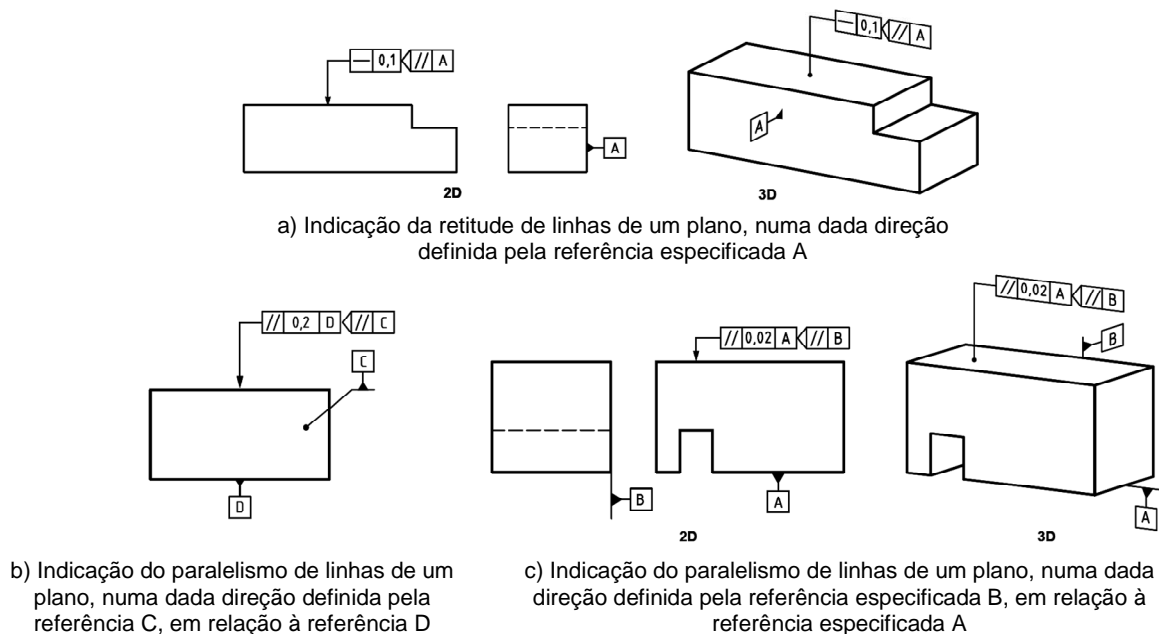


Figura 7.55 – Exemplos de aplicações de indicadores de planos de interseção. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Os planos de interseção possíveis estão indicados no quadro 7.7 (ver exemplos de aplicação na figura 7.56). Dependem da referência especificada utilizada para estabelecer o plano de interseção e do modo como o plano é construído a partir dessa referência especificada (de acordo com o símbolo indicado).

Quadro 7.7 – Casos de aplicação de planos de interseção. Adaptado do ISO/DIS 1101.2

Referência especificada considerada	Plano de interseção			
	Paralelo a	Perpendicular a	Inclinado em relação a	incluindo
Eixo de superfície de revolução (cilindro ou cone)	Não aplicável	SIM <sup>b)</sup>	SIM	SIM <sup>d)</sup>
Plano (integral ou mediano)	SIM <sup>a)</sup>	SIM <sup>c)</sup>	SIM	Não aplicável

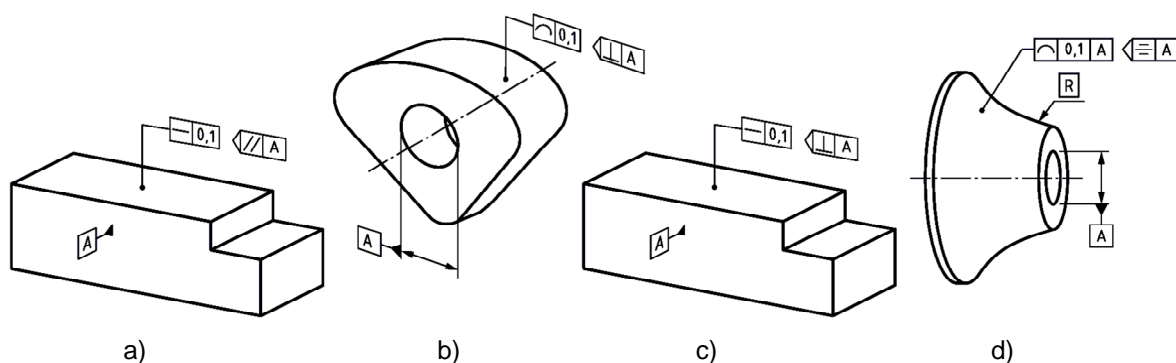


Figura 7.56 – Exemplos de casos de aplicação de indicadores de planos de interseção. Adaptada do ISO/DIS 1101.2



### 7.4.2.2 Planos de orientação

Para identificar a orientação de uma zona de tolerância, pode ser necessário estabelecer um **plano de orientação**, a partir de um elemento extraído da peça. A sua utilização permite definir a direção da largura da zona de tolerância, independentemente das dimensões teoricamente exatas (TEDs) (em tolerâncias de posição) ou da referência especificada (em tolerâncias de orientação).

Os planos de orientação só devem ser indicados quando, em simultâneo (ver figuras 7.58):

- o elemento considerado é uma linha mediana ou um ponto mediano (elementos derivados) toleranciado segundo uma das direções cartesianas do sistema de referências especificadas;
- a largura da zona de tolerância está limitada por dois planos paralelos;
- a zona de tolerância está orientada em relação a outro elemento, estabelecido a partir de um elemento extraído da peça, que identifica a sua orientação.

Para o estabelecimento de planos de orientação, apenas devem ser utilizadas superfícies pertencentes a uma das seguintes classes de invariância: de revolução, cilíndrica e plana. Um plano de orientação deve ser especificado através de um **indicador de plano de orientação**, colocado como uma extensão para a direita do indicador de tolerância (ver figuras 7.57 e 7.58), que define o plano de orientação a considerar, a partir da referência especificada inscrita no compartimento do lado direito.

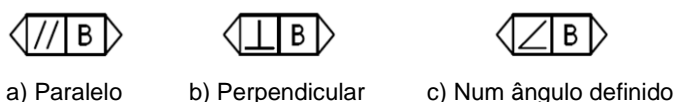
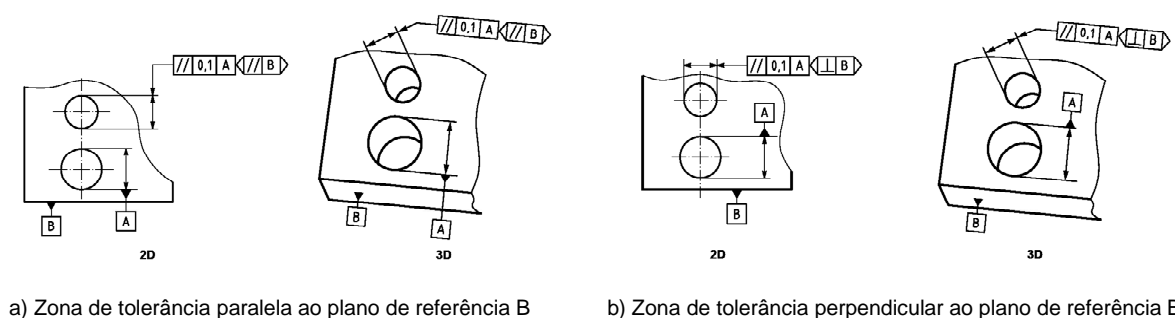


Figura 7.57 – Exemplos de indicadores de planos de orientação (ISO/DIS 1101.2)

Um plano de orientação deve ser estabelecido paralelo, perpendicular ou segundo um ângulo definido (diferente de  $0^\circ$  ou  $90^\circ$ ) por intermédio de uma dimensão teoricamente exata explícita, em relação à referência especificada inscrita no compartimento do lado direito do indicador do plano de orientação (ver figuras 7.58).



(continua)

Figura 7.58 – Exemplos de indicadores de planos de orientação. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

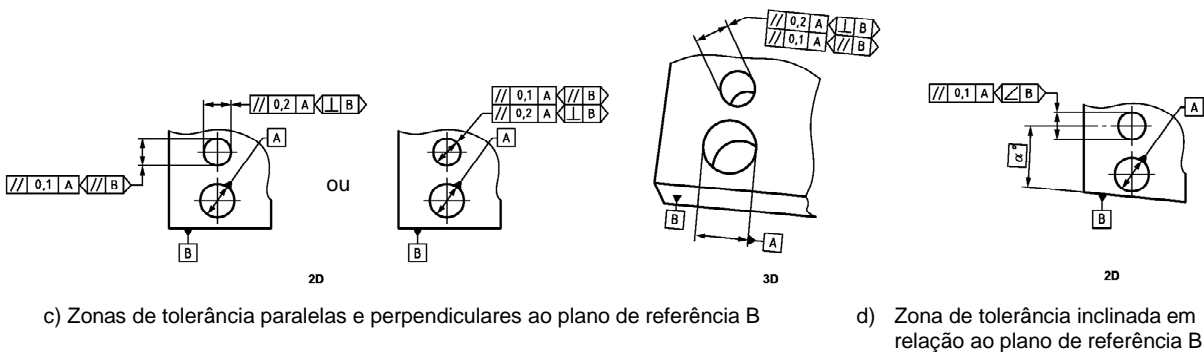
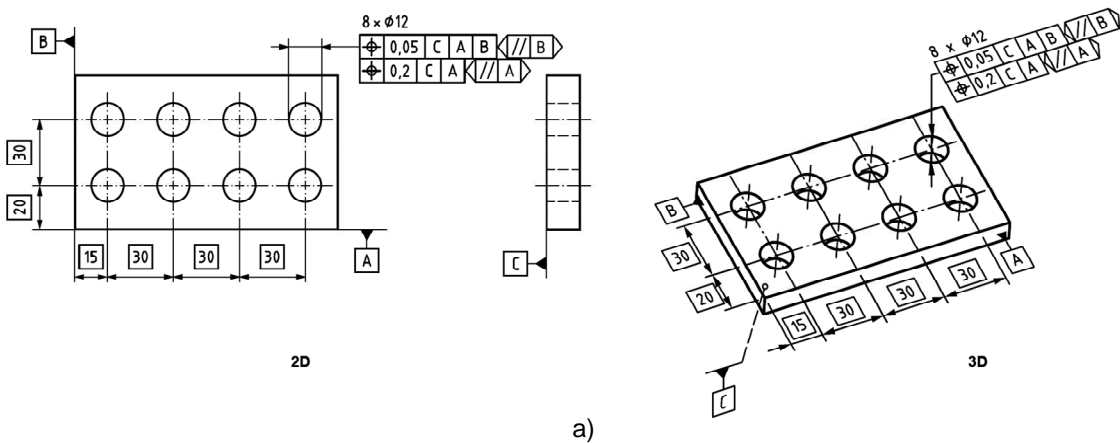


Figura 7.58 – Exemplos de indicadores de planos de orientação. Adaptada do ISO/DIS 1101.2 (conclusão)

Os planos de orientação possíveis estão indicados no quadro 7.8 (ver exemplos de aplicação na figura 7.59). Dependem da referência especificada utilizada para estabelecer o plano de orientação e do modo como o plano é construído a partir dessa referência especificada (de acordo com o símbolo indicado).

Quadro 7.8 – Casos de aplicação de planos de orientação. Adaptado do ISO/DIS 1101.2

Referência especificada considerada	Plano de orientação		
	Paralelo a	Perpendicular a	Inclinado em relação a
Eixo de superfície de revolução (cilindro ou cone)	Não aplicável	SIM	SIM
Plano (integral ou mediano)	SIM a)	SIM b)	SIM c)



(continua)

Figura 7.59 – Exemplos de casos de aplicação de indicadores de planos de orientação. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

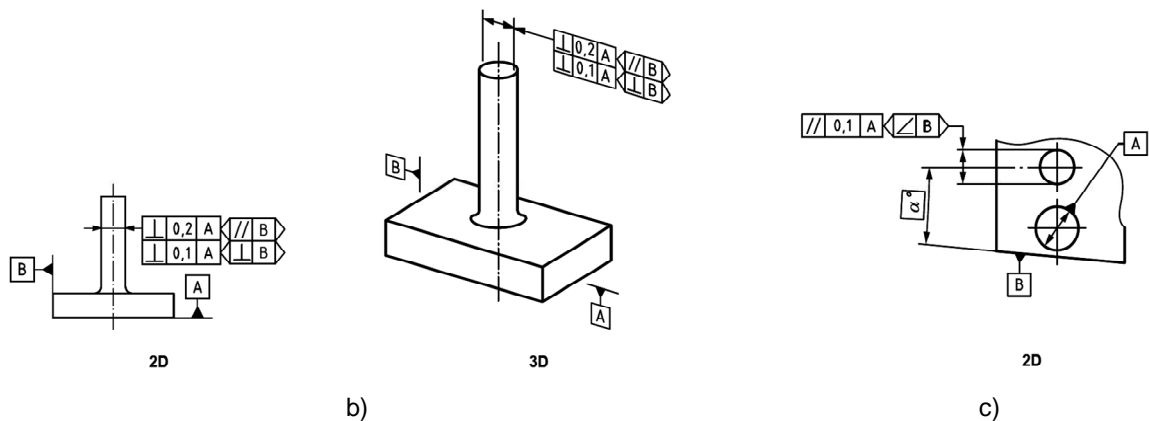


Figura 7.59 – Exemplos de casos de aplicação de indicadores de planos de orientação. Adaptada do ISO/DIS 1101.2 (conclusão)

### 7.4.2.3 Elementos de direção

Para identificar a direção da largura de uma zona de tolerância, pode ser necessário estabelecer um **elemento de direção** a partir de um elemento extraído da peça. Este procedimento utiliza-se quando o elemento toleranciado é um elemento integral e a largura da zona de tolerância não é perpendicular à sua superfície. Na caracterização da **circularidade de superfícies de revolução que não sejam cilíndricas nem esféricas**, devem ser sempre utilizados elementos de direção adequados para indicar a direção da largura da zona tolerância.

Para o estabelecimento de elementos de direção, apenas podem ser utilizadas superfícies pertencentes a uma das seguintes classes de invariância: de revolução, cilíndrica e plana. Um elemento de direção deve ser especificado através de um **indicador de elemento de direção**, colocado como uma extensão para a direita do indicador de tolerância (ver figuras 7.60 a 7.62), que define o elemento a partir da referência especificada inscrita no compartimento do lado direito (ver exemplos na figura 7.60).



Figura 7.60 – Exemplos de indicadores de elementos de direção (ISO/DIS 1101.2)

Um elemento de direção deve ser indicado quando:

- o elemento toleranciado é um elemento integral, e
- a largura da zona de tolerância não é normal à geometria especificada, ou
- a tolerância de circularidade é aplicada a uma superfície de revolução que não é cilíndrica nem esférica.

Os elementos de direção possíveis estão indicados no quadro 7.9 (ver exemplos nas figuras 7.61 e 7.62). Dependem da referência especificada utilizada para estabelecer o elemento de direção e do

modo como a direção é derivada a partir dessa referência especificada (de acordo com o símbolo indicado). O **símbolo de batimento** deve ser empregue quando a direção é definida na perpendicular à superfície e só pode ser utilizado se o elemento toleranciado tiver sido também indicado como sendo a referência especificada [ver figura 7.61 c)]. Neste caso, a direção da largura da zona de tolerância é estabelecida pela superfície do elemento e não pelo seu elemento derivado.

Quadro 7.9 – Casos de aplicação de elementos de direção. Adaptado do ISO/DIS 1101.2

Referência especificada considerada	Elemento de direção			
	Paralelo a	Perpendicular a	Inclinado em relação a	De batimento em relação a
Eixo de superfície de revolução (cilindro ou cone)	SIM	SIM a)	SIM b)	SIM c)
Plano (integral ou mediano)	SIM	SIM	SIM	Não aplicável

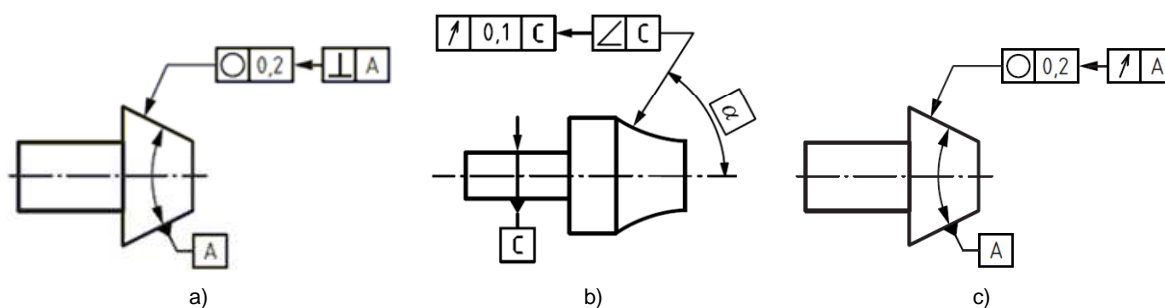


Figura 7.61 – Exemplos de casos de aplicação de indicadores de elementos de direção. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Quando o elemento de referência identificado pelo indicador de tolerância é o mesmo elemento que estabelece o elemento de direção, este último pode ser omissa, pelo que os exemplos indicados nas figuras 7.62 a) e 7.62 b) têm o mesmo significado.

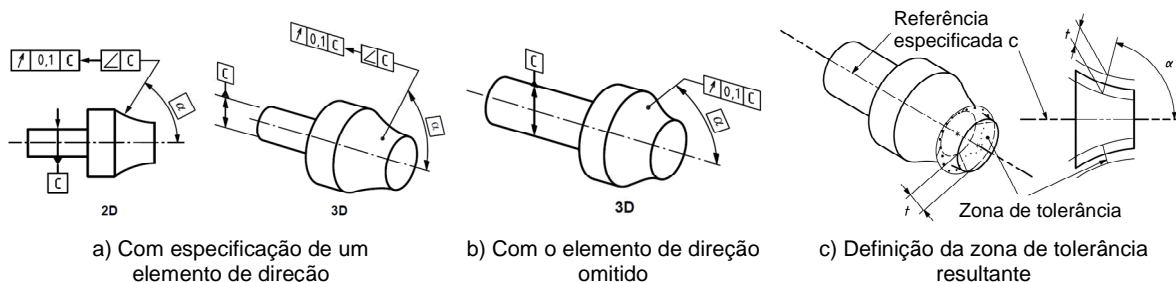


Figura 7.62 – Exemplos de indicações da especificação de uma tolerância de batimento circular numa direção especificada e definição da correspondente zona de tolerância. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Neste exemplo, a linha extraída em qualquer uma das secções cónicas (de ângulo  $\alpha$ ) correspondentes a um elemento de direção (cone de semiângulo  $\alpha$ ), cujo eixo coincide com o eixo de referência C, deve estar contida entre duas circunferências distantes de 0,1 mm, entre si, no interior da secção cónica [ver figura 7.62 c)].

#### 7.4.2.4 Planos de coleção

Para definir um elemento geométrico composto contínuo (constituído por vários elementos simples reunidos sem espaços entre eles) e fechado, poderá ser necessário estabelecer um **plano de coleção**, a partir de um elemento extraído da peça. Este tipo de plano deve ser sempre especificado quando se utiliza o símbolo “a toda a volta”,  $\bigcirc$ , sendo a sua identificação efetuada por meio de um **indicador de plano de coleção**, p. ex.  $\bigcirc \parallel A$  (ver exemplo na figura 7.63). Um requisito “a toda a volta” aplica-se apenas às superfícies identificadas pelo plano de coleção e não à totalidade da peça (ver exemplo na figura 7.64).

Se um requisito se aplicar a um conjunto de elementos de linha de uma superfície composta contínua e fechada (definida através de um plano de coleção), deve também colocar-se um identificador de plano de interseção, entre o indicador de tolerância e o indicador de plano de coleção, para identificar o plano de interseção [ver figura 7.63 a)].

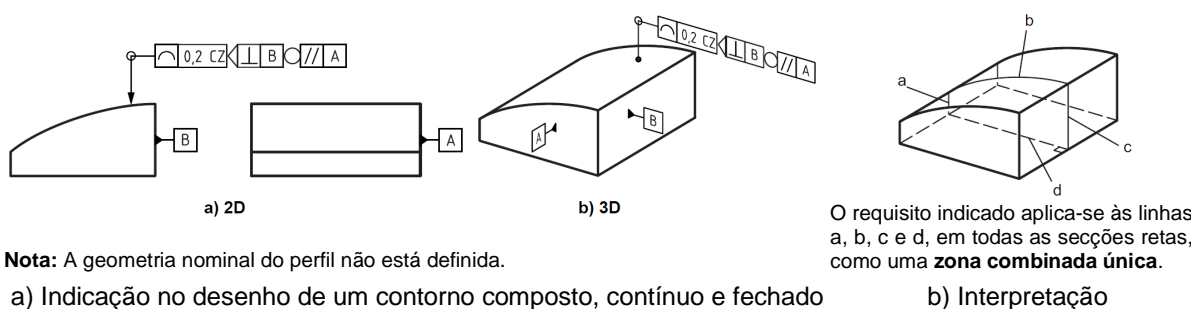


Figura 7.63 – Exemplo de indicação da tolerância do perfil de uma linha em conjunto com o requisito “a toda a volta” e um indicador de plano de coleção. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Com tolerâncias do perfil de uma linha, se o plano de interseção e o plano de coleção forem os mesmos, o indicador de plano de coleção pode ser omissivo.

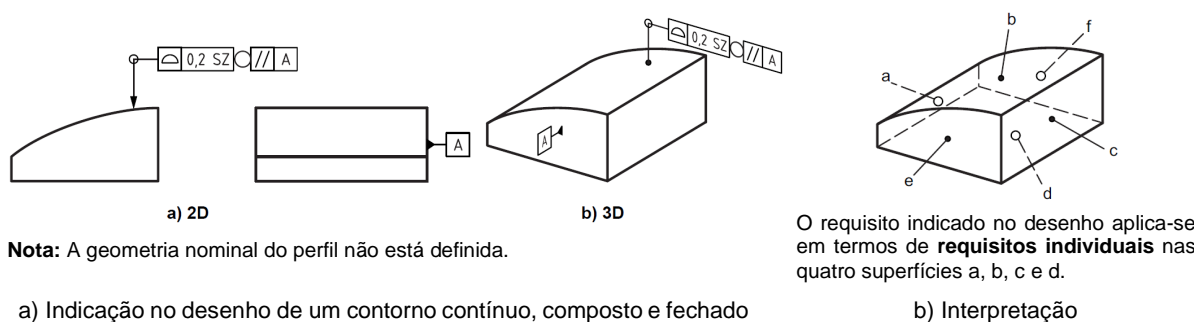


Figura 7.64 – Exemplo de indicação da tolerância do perfil de uma superfície em conjunto com o requisito “a toda a volta” e um indicador de plano de coleção. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

A peça tem de ser relativamente simples para que uma indicação “a toda a volta” possa ser inequívoca. Por exemplo, se houvesse um furo vertical no meio da peça, representada nas figuras 7.63 e 7.64, não seria claro se a especificação se aplicaria, ou não, à superfície do furo. Nestas figuras, o plano de coleção pode ser um plano qualquer paralelo à referência especificada A.

Dependendo da posição do plano de coleção, este poderia, ou não, interseitar o furo. Em tais casos, não se deve utilizar a indicação “a toda a volta”.

### 7.4.3 Indicações adjacentes ao indicador de tolerância

Existem duas zonas adjacentes aos indicadores de tolerância nas quais podem ser inscritas indicações suplementares, ver figura 7.65.

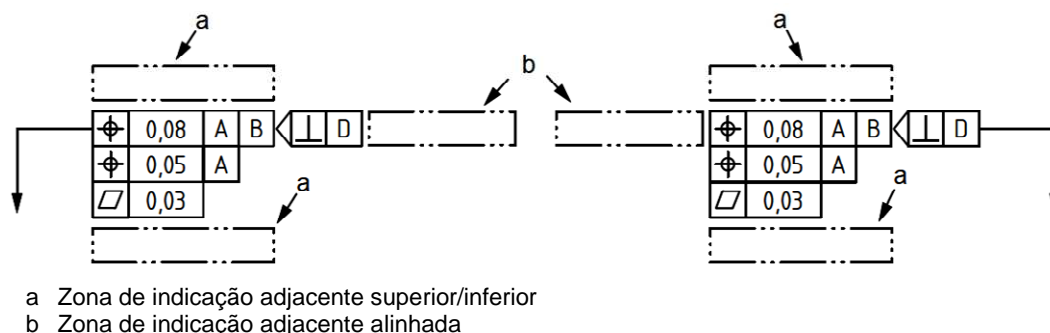


Figura 7.65 – Zonas adjacentes ao indicador de tolerância para a inscrição de indicações suplementares. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

As indicações que se aplicam a todos os indicadores de tolerância devem ser indicadas na zona de indicação, **a**, superior (preferencial) ou inferior. As indicações que se aplicam apenas a um indicador de tolerância devem ser indicadas numa zona de indicação alinhada, **b**, com esse indicador.

No caso do elemento tolerenciado não ser o elemento geométrico completo, deve ser inscrita uma indicação especificando qual o elemento tolerenciado, nomeadamente:

- **ACS** (secção reta qualquer), se o elemento tolerenciado for uma linha ou um ponto de interseção definido pela interseção de um elemento integral extraído ou de uma linha mediana extraída com um plano de corte. Este elemento de especificação só pode ser aplicado a superfícies de revolução, superfícies cilíndricas e superfícies prismáticas, ver exemplo na figura 7.8.
- **Letras** que indicam posições no elemento, separadas pelo símbolo “entre”,  $\longleftrightarrow$ , se o elemento tolerenciado é um **elemento restrito** (ver figura 7.66) ou se a largura da zona de tolerância variar proporcionalmente entre essas posições (ver figura 7.16).

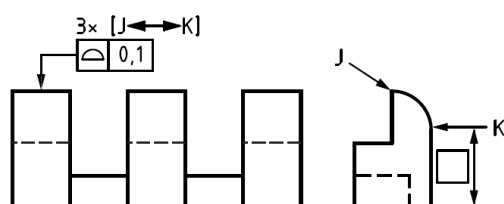


Figura 7.66 – Exemplo de indicação de um conjunto de elementos restritos toleranciados. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Se a tolerância se aplicar a vários elementos, tal deve ser indicado de acordo com os exemplos apresentados nas figuras 7.27 a 7.29 e na norma ISO 5458. Se os elementos forem considerados como um **elemento unificado** (elemento composto que poderá ser, ou não, contínuo), deve ser acrescentado o componente de especificação **UF**. No exemplo da figura 7.67, o elemento cilíndrico é definido a partir de uma coleção de elementos curvos, identificados através da indicação adicional **nx**.

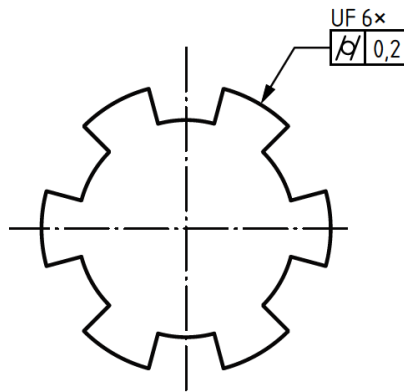


Figura 7.67 – Exemplo de indicação de uma tolerância que se aplica a um elemento unificado. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

A definição de “elemento unificado”, atrás indicada, é muito abrangente, de modo a não excluir qualquer aplicação útil. No entanto, esta definição não deve servir para considerar como elemento unificado qualquer coisa que, por natureza, é composta por vários elementos distintos (ISO/DIS 1101.2).

Para **roscas** (“*screw threads*”), **elementos estriados** (“*splines*”) e **rodas dentadas** (“*gears*”), podem utilizar-se diferentes identificadores de elementos toleranciados. As tolerâncias e as referências especificadas para roscas aplicam-se ao eixo derivado do cilindro primitivo correspondente ao diâmetro nos flancos, salvo indicação em contrário, como p. ex. **MD** para o diâmetro maior e **LD** para o diâmetro menor, ver exemplo na figura 7.68. As tolerâncias e as referências especificadas para elementos estriados e rodas dentadas devem designar a característica específica à qual se aplicam, ou seja, **PD** para o diâmetro primitivo, **MD** para o diâmetro maior ou **LD** para o diâmetro menor.

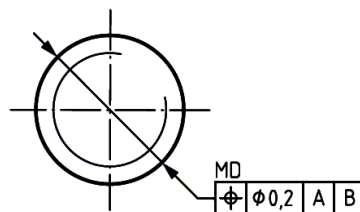


Figura 7.68 – Exemplo de indicação de uma tolerância de localização para um elemento roscado. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

A zona de indicação superior, adjacente ao indicador de tolerância, pode também conter informação suplementar com vista a permitir a identificação dos elementos geométricos aos quais se aplica(m) a(s) tolerância(s) especificada(s), ver figura 7.76. Esta informação pode incluir o número de

configurações (“*patterns*”), o número de elementos em cada configuração, a identificação dos elementos que pertencem à configuração e quaisquer tolerâncias de tamanho relativas aos elementos de tamanho da configuração, aos quais se aplica a tolerância geométrica, bem como informações respeitantes à extensão dos elemento(s) submetidos à referida tolerância (ver exemplos nas figuras 7.27 a 7.29). A norma ISO 5458 contém informações adicionais sobre configurações (“*patterns*”) de elementos e o seu toleranciamento.

#### 7.4.4 Indicação de especificações gerais, por omissão, específicas do desenho

Há especificações gerais ISO, por omissão, relativas à forma da zona de tolerância, ao critério de associação do elemento de referência para especificações de forma, ao parâmetro de avaliação de desvios geométricos de forma e ao elemento toleranciado [diâmetro nos flancos (“*pitch diameter*”)] para roscas.

A gama variada de aplicações da norma ISO 1101 torna impossível identificar uma filtragem, por omissão, que seja adequada para uma grande maioria dos utilizadores. Especificações gerais, por omissão, específicas do desenho, para a **filtragem**, podem ser indicadas junto da legenda, sob a forma de uma especificação, por omissão, para todas as especificações geométricas, ou através de especificações, por omissão, separadas para a forma, a orientação e a posição, por via da utilização dos símbolos indicados no quadro 7.10, seguidos pelo carácter “:”, pela inscrição “ISO 1101” e pela indicação da filtragem por omissão (ver o ponto 1, da secção 7.4.1.2.2, deste texto).

Quadro 7.10 – Símbolos para a especificação da filtragem, por omissão. Adaptado do ISO/DIS 1101.2

Símbolo	Significado	Campo de aplicação da omissão
TF	Elemento toleranciado	Todas as especificações geométricas
TFF	Elemento toleranciado, forma	Especificações de forma
TFO	Elemento toleranciado, orientação	Especificações de orientação
TFL	Elemento toleranciado, posição	Especificações de posição

**EXEMPLO 1** TF: ISO 1101 G0,8-×50- especifica que a filtragem, por omissão, é um filtro gaussiano passa-baixo com um valor de corte de 0,8 mm, para perfis abertos, e de 50 UPR, para perfis fechados.

A especificação geral, por omissão, específica do desenho, para o **critério de associação relativo às características geométricas de forma**, pode ser indicada junto da legenda através da inscrição **FC: ISO 1101** seguido pela símbolo para o critério de associação, por omissão (ver ponto 1, da secção 7.4.1.2.3). FC significa “*form characteristic*”, isto é, “característica de forma”.

**EXEMPLO 2** FC: ISO 1101 G especifica que o critério de associação, por omissão, para a forma é o elemento dos mínimos quadrados (Gauss).



## 7.5 Indicações complementares

### 7.5.1 Indicações de um elemento toleranciado composto ou restrito

O elemento toleranciado pode ser uma porção de um elemento simples ou um elemento composto contínuo que pode ser indicado como:

- um elemento contínuo, fechado (simples ou composto);
- uma zona restrita de uma superfície simples;
- um elemento contínuo, não fechado (simples ou composto).

#### 7.5.1.1 Símbolos modificadores “a toda a volta” e “em toda a envolvente” – elemento toleranciado contínuo fechado

Numa dada peça, se a tolerância de uma característica geométrica for aplicada aos contornos das secções transversais ou a todos os elementos representados por uma linha de contorno fechada, tal deve ser indicado através do **símbolo "a toda a volta"** (“all-around”),  $\bigcirc$ , colocado na interseção da linha de indicação com a linha de referência do indicador de tolerância (ver exemplos nas figuras 7.69 a 7.70). Um requisito “a toda a volta” aplica-se apenas às superfícies definidas pelo plano de coleção identificado através do respetivo indicador (ver secção 7.4.2.4 deste texto). Se a tolerância de uma característica geométrica se aplicar a todos os elementos de uma peça, tal deve ser indicado através do **símbolo "em toda a envolvente"** (“all over”),  $\odot$ , (ver exemplo na figura 7.72).

Um símbolo “a toda a volta” ou “em toda a envolvente” deve ser sempre combinado com um componente de especificação **SZ**, **CZ** ou **UF** (ISO/DIS 1101.2). A definição da geometria nominal de superfícies complexas deve ser feita por intermédio de dimensões teoricamente exatas (TEDs).

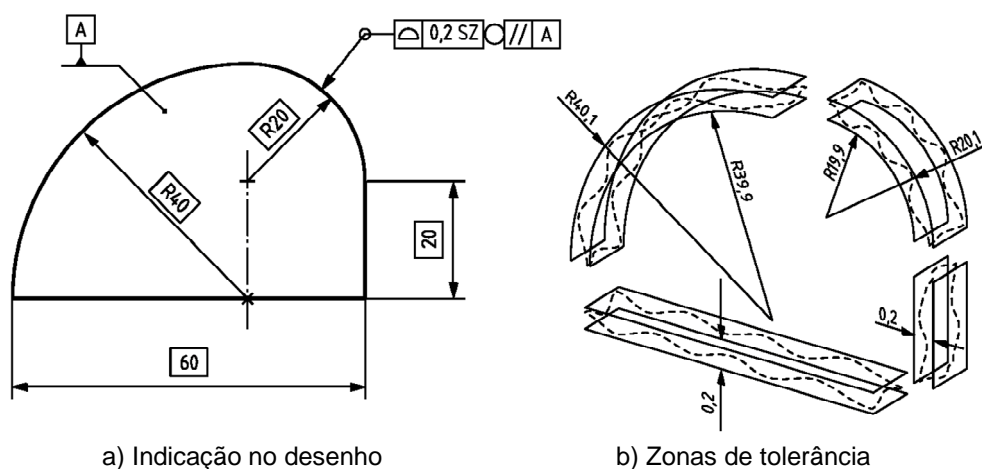


Figura 7.69 – Exemplo de especificação da tolerância do perfil de uma superfície para um conjunto de elementos independentes. Adaptada do ISO/DIS 1660

Se o componente **SZ** (zonas separadas) for utilizado em conjunto com o símbolo "a toda a volta" ou "em toda a envolvente", a tolerância da característica deve ser aplicada apenas em termos de requisitos individuais relativos a cada um dos elementos indicados. Neste caso, as zonas de tolerância dos elementos não estão ligadas entre si e a utilização do símbolo "a toda a volta" ou "em toda a envolvente" é equivalente ao uso de  $n$  linhas de indicação, cada uma delas apontando para um dos elementos toleranciados, ou à inscrição da indicação  $n\times$  adjacente ao indicador de tolerância (ver exemplo na figura 7.69).

Se a tolerância de uma característica for especificada como uma configuração ("pattern") de zonas de tolerância relativas a todos os elementos indicados, de modo que as zonas de tolerância de todos os elementos tenham uma relação teoricamente exata entre si e que a transição de uma zona de tolerância para a seguinte seja constituída por extensões das duas zonas, dando origem, desse modo, a arestas vivas, deve indicar-se um componente de especificação **CZ** (zona combinada), em conjunto com o símbolo "a toda a volta" ou "em toda a envolvente" (ver exemplo na figura 7.70).

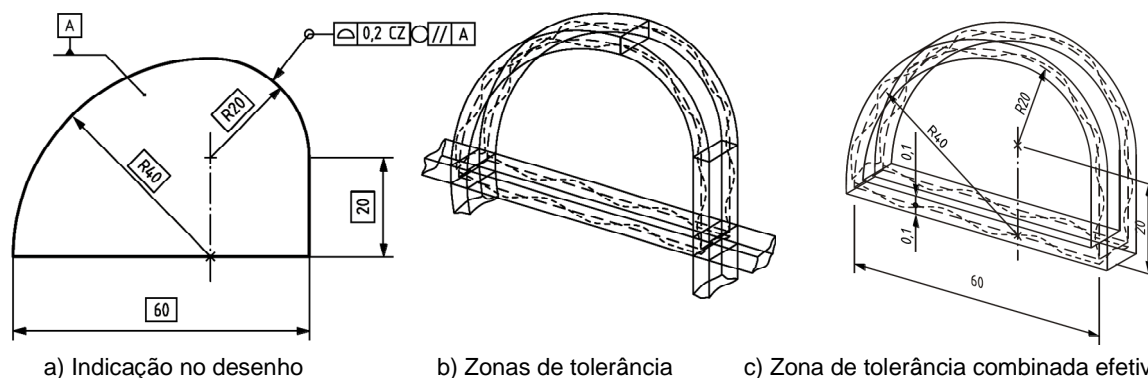


Figura 7.70 – Exemplo de especificação da tolerância do perfil de uma superfície combinada para um conjunto de elementos. Adaptada do ISO/DIS 1660

No caso dos elementos identificados deverem ser considerados como um elemento único, o componente de especificação **UF** (elemento unificado) deve ser utilizado em conjunto com o símbolo "a toda a volta" ou "em toda a envolvente" (ver exemplos nas figuras 7.71 e 7.72).

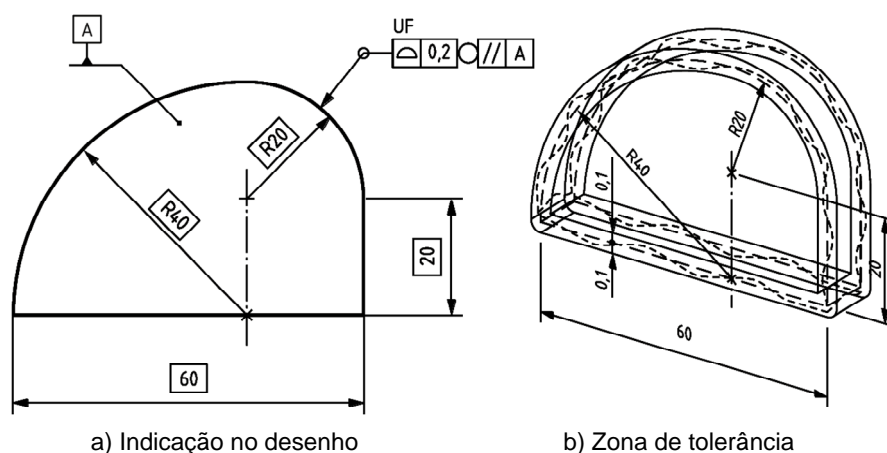


Figura 7.71 – Exemplo de especificação da tolerância do perfil de uma superfície para um elemento unificado, em conjunto com o símbolo "a toda a volta". Adaptada do ISO/DIS 1660

Uma vez que, neste tipo de especificação, a periferia é considerada como um elemento único, as esferas que definem os limites da zona de tolerância rolam em contacto com as descontinuidades do elemento e dão origem a cantos arredondados na zona de tolerância, do lado exterior das descontinuidades (ver figura 7.71).

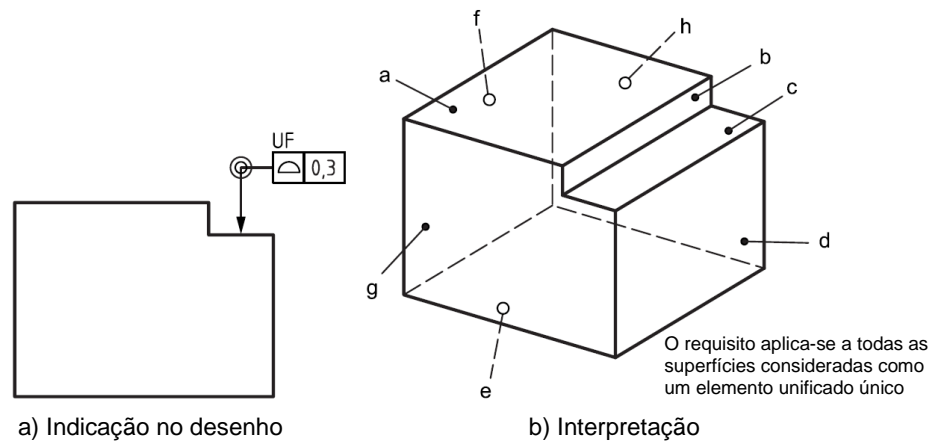


Figura 7.72 – Exemplo de tolerância do perfil de uma superfície para um elemento unificado, em conjunto com o símbolo "em toda a envolvente". Adaptada do ISO/DIS 1101.2

### 7.5.1.2 Elemento toleranciado indicado como zona restrita

Uma zona restrita toleranciada pode ser definida por meio dos seus limites indicados por uma linha a traço longo-ponto grosso [ver figuras 7.73 a) e 7.73 c) a 7.73 e)] ou através dos seus pontos extremos, identificados por letras maiúsculas, associadas com o símbolo “entre”,  $\longleftrightarrow$ , inscrito na zona adjacente superior do indicador de tolerância [ver figura 7.73 b)].

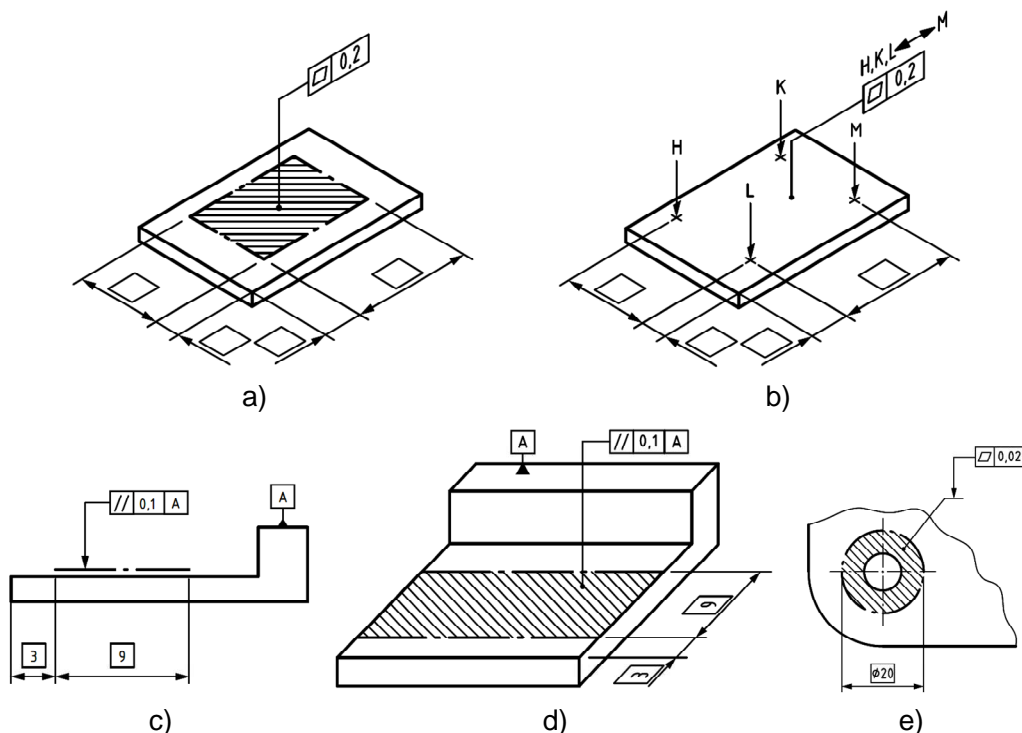


Figura 7.73 – Exemplos de indicação de zonas restritas toleranciadas. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

As dimensões das zonas restritas e as dimensões do seu posicionamento devem ser definidas através de dimensões teoricamente exatas (TEDs).

### 7.5.1.3 Elemento toleranciado contínuo e não fechado

Se uma tolerância se aplicar a uma parte restrita e identificada de um elemento ou a partes restritas contíguas de elementos contíguos, mas não se aplicar ao contorno completo das secções retas (ou a toda a superfície representada pelo contorno), esta restrição deve ser indicada utilizando o símbolo  $\longleftrightarrow$  (“entre”) e identificando o início e o fim do elemento toleranciado, por meio de letras maiúsculas, ver figura 7.74.

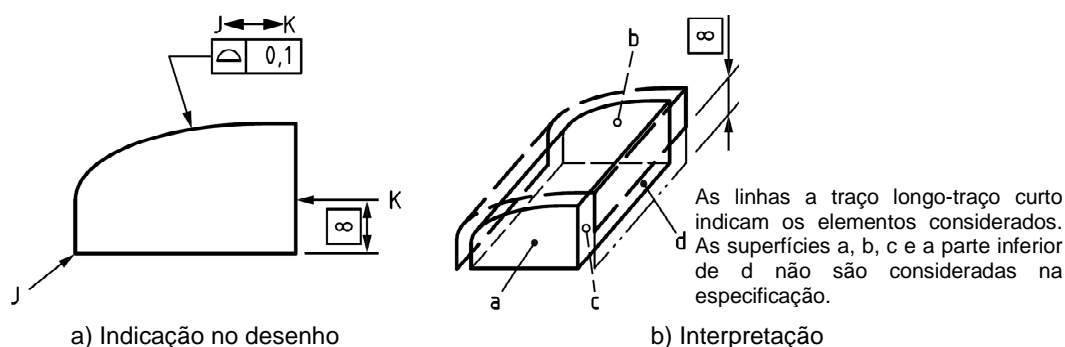


Figura 7.74 – Aplicação do símbolo “entre” a um elemento toleranciado contínuo e não fechado. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

No caso do valor da tolerância ser variável ao longo do comprimento do elemento composto, tal deve ser indicado de acordo com a figura 7.16. Se a mesma especificação se aplicar a um conjunto de elementos compostos toleranciados, esse conjunto pode ser indicado na zona adjacente superior ao indicador de tolerância, ver figuras 7.66 e 7.75 a).

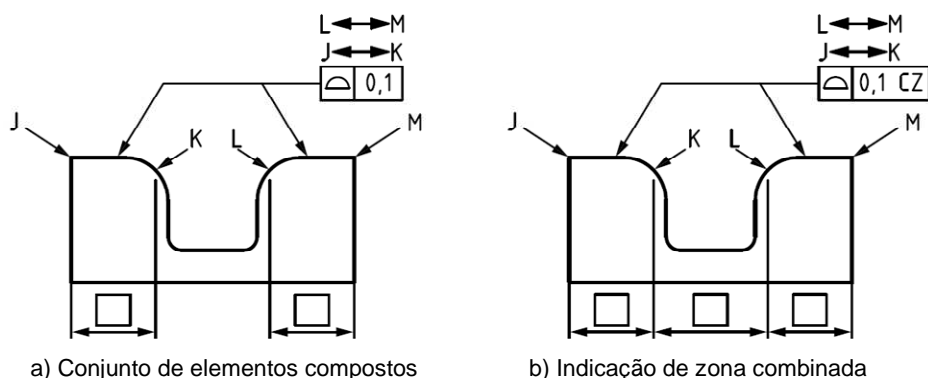


Figura 7.75 – Aplicação do símbolo “entre” a um elemento toleranciado contínuo e não fechado. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

A especificação de uma zona combinada pode também ser aplicada na definição de uma zona de tolerância composta combinada, ver figura 7.75 b).

## 7.6 Dimensões teoricamente exatas

As **dimensões teoricamente exatas** (TED – “*theoretically exact dimensions*”) são dimensões nominais, indicadas na documentação técnica de produtos, que não são afetadas por tolerâncias dimensionais individuais ou gerais. Estas dimensões podem ser lineares ou angulares. Uma dimensão teoricamente exata pode definir a extensão ou a posição relativa de uma porção de um elemento (ver figura 7.73); o comprimento do prolongamento de um elemento [ver figura 7.78 a)]; a orientação ou a posição teórica em relação a um ou a vários elementos (ver figura 7.76) ou a forma nominal de um elemento [ver figuras 7.69 a), 7.70 a) e 7.71 a)].

Se forem especificadas tolerâncias geométricas de posição, de orientação ou de perfil, para um elemento ou um grupo de elementos, as dimensões que definem, respetivamente, a posição, a orientação ou o perfil teoricamente exatos são “dimensões teoricamente exatas”, que podem ser explícitas ou implícitas. Este tipo de dimensões utilizam-se também para definir a orientação relativa de referências especificadas de um sistema (ver exemplos na secção 7.8). As dimensões teoricamente exatas não devem ser diretamente toleranciadas e, quando são explícitas, devem ser representadas enquadradas (ver figura 7.76).

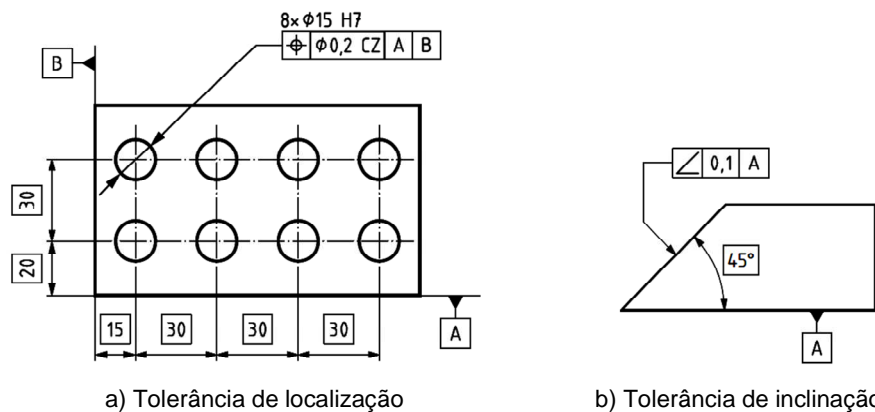


Figura 7.76 – Exemplos de utilização de dimensões teoricamente exatas em especificações de tolerâncias geométricas. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

Na figura 7.76 a), a inscrição do modificador **CZ**, no indicador de tolerância, significa que a tolerância de localização se aplica a uma configuração (“*pattern*”) homogénea, constituída por 8 furos Ø15 H7 e restringida a partir do sistema de referências especificadas A e B, por intermédio de dimensões teoricamente exatas.

## 7.7 Elemento toleranciado projetado

Na elaboração do desenho de definição de uma peça, o estabelecimento da sua especificação geométrica requer a realização prévia de uma correta análise funcional do conjunto em que a peça se integra. Por omissão, uma tolerância aplica-se em toda a extensão do elemento considerado, salvo

qualquer indicação em contrário, podendo acontecer que, em alguns casos, esse toleranciamento não seja suficiente para caracterizar zonas que, apesar de serem exteriores ao elemento toleranciado, intervêm no seu funcionamento.

Nestes casos, utiliza-se um “elemento toleranciado projetado” (“*projected toleranced feature*”), anteriormente designado por “zona de tolerância projetada”, em conjugação com toleranciamento geométrico, para controlar ou limitar, por exemplo, uma variação extrema na perpendicularidade de elementos roscados (ou não roscados), de furos para ajustamentos com aperto ou elementos similares, ver exemplos na figura 7.77.

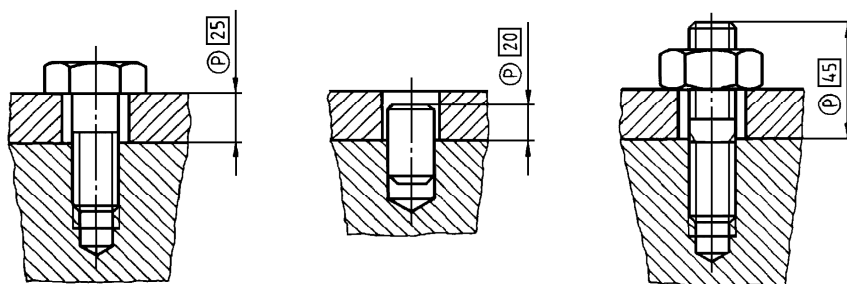
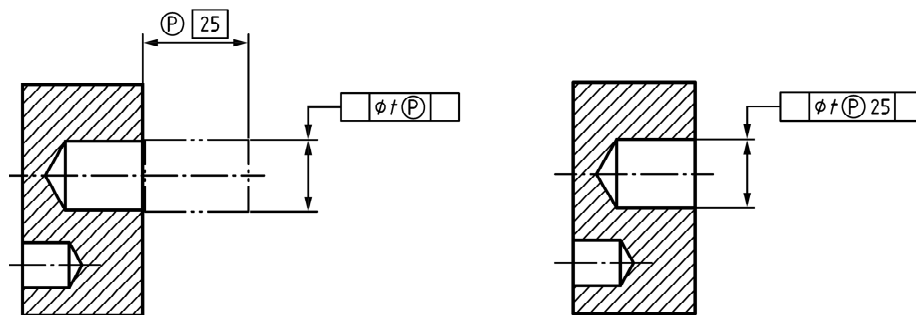


Figura 7.77 – Exemplos de comprimentos funcionais de elementos tolerânciados projetados (ISO 10578)

O símbolo modificador  $\textcircled{P}$  inscrito após o valor da tolerância, na segunda secção do indicador de tolerância, assinala a especificação de um elemento toleranciado projetado (ver figura 7.78). Neste caso, o elemento toleranciado é uma porção do elemento prolongado (um cilindro ou um plano associado), se a linha de indicação da especificação geométrica apontar diretamente para o elemento, ou uma porção do seu elemento derivado (um eixo ou um plano mediano do elemento associado), se a linha de indicação da especificação geométrica apontar para o prolongamento da linha de cota do elemento (ver figura 7.78).

O elemento prolongado é um elemento associado construído a partir do elemento real. O **critério de associação, por omissão**, para o elemento prolongado, é a minimização da maior das distâncias entre o elemento real indicado e o elemento associado, com a restrição adicional do contacto ser exterior à matéria (ISO/DIS 1101.2). Os limites da porção relevante deste elemento prolongado devem ser claramente definidos e indicados direta ou indiretamente.



a) Indicação direta do elemento toleranciado b) Indicação indireta do elemento toleranciado

Figura 7.78 – Exemplos de indicação de uma especificação geométrica com o modificador de tolerância projetada (ISO/DIS 1101.2)

Quando se indica diretamente o comprimento do elemento toleranciado projetado, através de um elemento integral “virtual” que representa a porção do elemento prolongado a considerar, este elemento virtual deve ser representado por meio de uma linha a traço longo-dois pontos fino e o seu comprimento deve ser indicado com a colocação do símbolo  $\textcircled{P}$  antes do valor da respectiva dimensão teoricamente exata [ver figura 7.78 a)].

Quando se indica indiretamente o comprimento do elemento de tolerância projetada, no indicador de tolerância, esse valor deve ser indicado após o símbolo  $\textcircled{P}$  [ver figura 7.78 b)]. Neste caso, a representação do elemento prolongado, por meio de uma linha a traço longo-dois pontos fino, deve ser omissa. **Esta indicação indireta aplica-se apenas a furos cegos.**

A origem do elemento projetado deve ser construída a partir do plano de referência (plano associado ao primeiro plano real que intersesta o elemento considerado), sujeito à restrição de ser perpendicular ao elemento prolongado (ver figura 7.79).

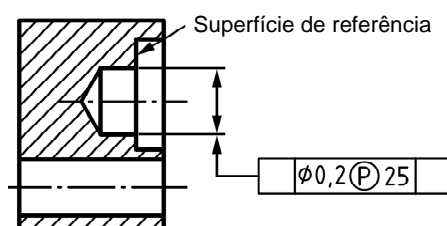


Figura 7.79 – Superfície de referência do elemento toleranciado projetado (ISO/DIS 1101.2)

Por omissão, a origem do elemento toleranciado projetado corresponde à posição do plano de referência (ver figura 7.79). Se a origem do elemento projetado estiver deslocada de um valor medido na perpendicular em relação à superfície de referência (“offset”), ver figura 7.80 a), tal deverá ser indicado diretamente [ver figura 7.80 b)] ou indiretamente [ver figura 7.80 c)].

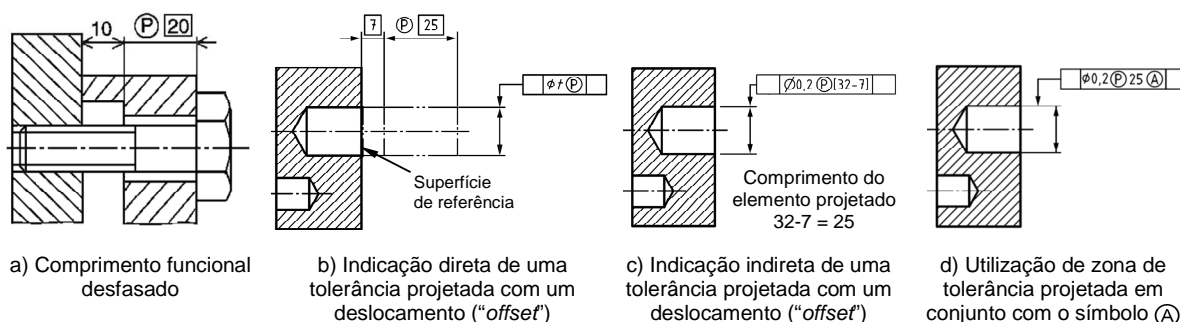


Figura 7.80 – Exemplos de especificações de elementos toleranciados projetados. Adaptada do ISO/DIS 1101.2

O símbolo modificador  $\textcircled{P}$  pode ser utilizado com outros modificadores de especificação, conforme seja apropriado. Na figura 7.80 d), apresenta-se um exemplo da sua aplicação em conjunto com o símbolo modificador para um elemento mediano  $\textcircled{A}$ .

### 7.7.1 Exemplo da indicação em desenho e sua interpretação

Considere-se o exemplo apresentado na figura 7.81 a), em que o parafuso (3) atravessa o furo de passagem da peça (2) e rosca na peça (1). Admitindo que o desenho de definição parcial adotado para a peça (1) é o indicado na figura 7.81 b), a interpretação da especificação correspondente está representada na figura 7.81 c).

A determinação da tolerância de localização adotada para o furo roscado foi efetuada tendo em conta que a soma das tolerâncias de localização dos furos das duas peças deve ser igual à soma das folgas mínimas entre todos os elementos. Como a folga entre o parafuso (3) e o furo roscado da peça (1) é muito pequena, em comparação com a folga registada entre o parafuso (3) e o furo de passagem da peça (2),  $T_{LOC2} + T_{LOC1} = F_{\min} = 30,2 - 30 = 0,2$ , logo, numa situação mais geral,  $T_{LOC2} = T_{LOC1} = (30,2 - 30) / 2 = \varnothing 0,1$ .

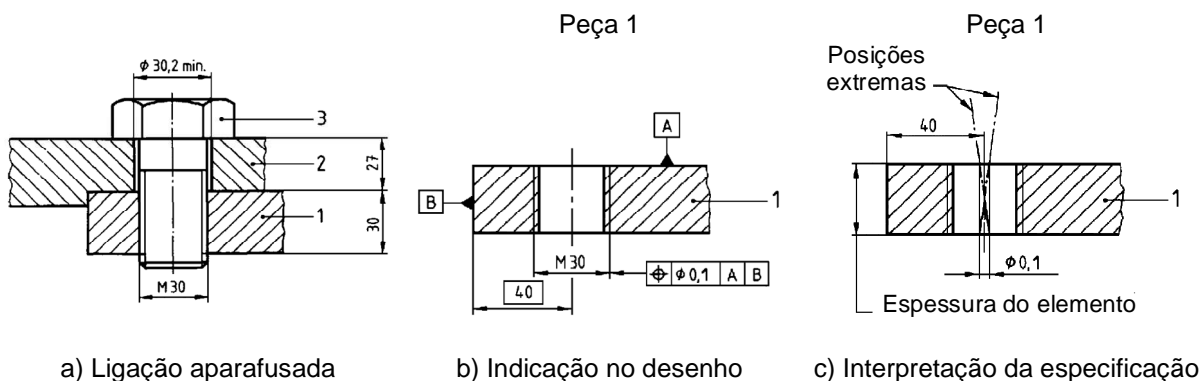


Figura 7.81 – Exemplo de uma ligação aparafusada com o desenho de definição parcial de uma das peças.  
Adaptada da ISO 10578

A localização do eixo do furo roscado na peça (1), visível na figura 7.82 a), admitindo desvios de localização nos eixos dos furos das duas peças, mostra que poderia não ser possível inserir o parafuso simultaneamente em ambas as peças.

No entanto, existem várias soluções alternativas que poderiam ser adotadas para eliminar esta interferência previsível:

- Poderia aumentar-se o tamanho do furo de passagem da peça (2), tal como se mostra na figura 7.82 b), mas, em aplicações particulares, esta solução poderá não ser possível, se as condições funcionais derivadas da necessidade de uma boa articulação ou centragem das peças não o permitirem. O novo diâmetro  $D'_2$  do furo da peça (2) pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$D'_2 = d_3 + T_{LOC2} + T_{LOC1} (1 + 2 l_p / t_1) = 30 + 0,1 + 0,1 (1 + 2 \times 27 / 30) = 30,38 \approx 30,4 \quad (7.2)$$



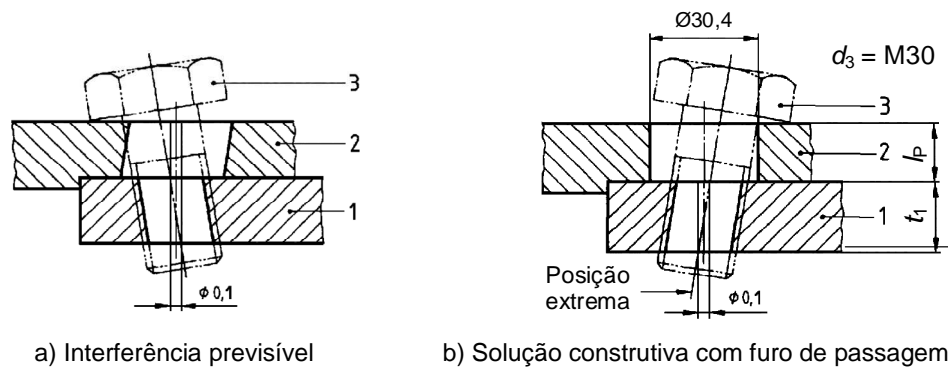


Figura 7.82 – Consequência previsível da especificação adotada e possível solução construtiva alternativa. Adaptada da ISO 10578

- b) Podia apertar-se a tolerância de localização do furo roscado da peça (1), mas tal poderia aumentar o custo de produção da peça.
- c) Podia especificar-se uma tolerância complementar, por exemplo, uma tolerância de perpendicularidade de valor inferior à tolerância de localização, mas isso também aumenta o custo de produção da peça.
- d) Alternativamente, poderá especificar-se um elemento tolerenciado projetado, tal como se indica na figura 7.83 b). Esta solução admite uma tolerância máxima, ao mesmo tempo que assegura a montagem das peças [figura 7.83 a)]. A correspondente interpretação é apresentada na figura 7.83 c).

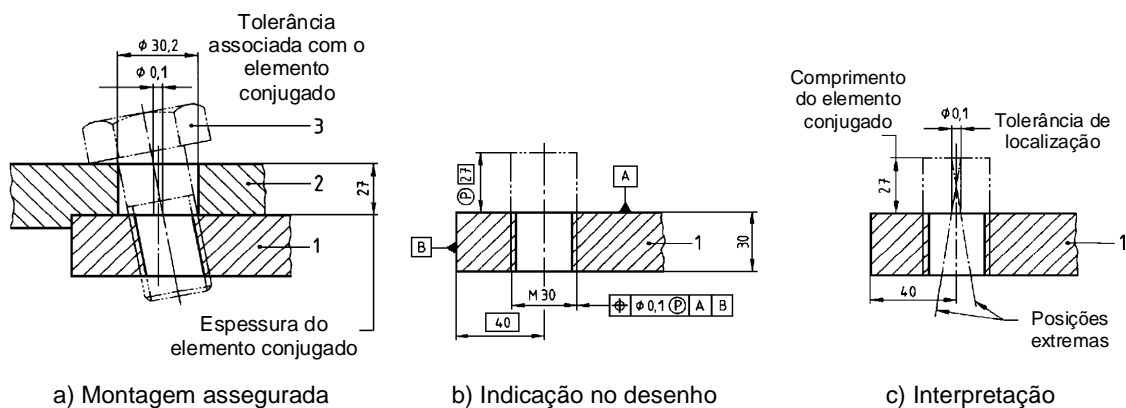


Figura 7.83 – Solução alternativa com a especificação de um elemento tolerenciado projetado. Adaptada da ISO 10578

## 7.8 Referências especificadas

### 7.8.1 Conceitos gerais

As **referências especificadas** são estabelecidas a partir de superfícies reais identificadas numa peça, com vista a permitir a orientação e/ou o posicionamento de zonas de tolerância (ver exemplos

nas figuras 7.84 e 7.85) e a definição de condições virtuais (ver o capítulo 8 deste texto e a norma ISO 2692). Podem ser consideradas como um meio para eliminar (restringir) graus de liberdade de uma zona de tolerância. O número de graus de liberdade eliminados depende da configuração nominal dos elementos utilizados para estabelecer a referência especificada ou o sistema de referências especificadas; da referência especificada ser primária, secundária ou terciária; e da característica toleranciada assinalada no indicador de tolerância geométrica (ver norma ISO 5459).

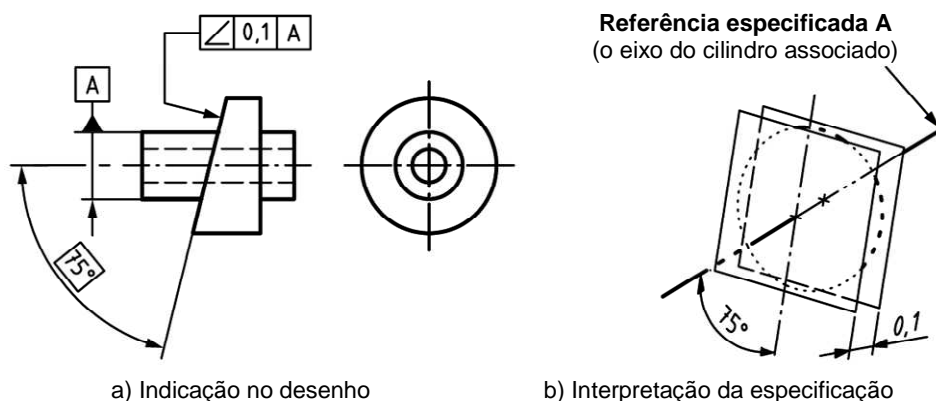


Figura 7.84 – Exemplo de zona de tolerância com uma restrição de orientação em relação a uma referência especificada. Adaptada da ISO 5459

Neste primeiro exemplo, a zona de tolerância está sujeita a uma restrição de orientação, por meio do ângulo teoricamente exato de 75°, em relação à referência especificada A, que é constituída pelo elemento de situação de um cilindro (o eixo do cilindro associado).

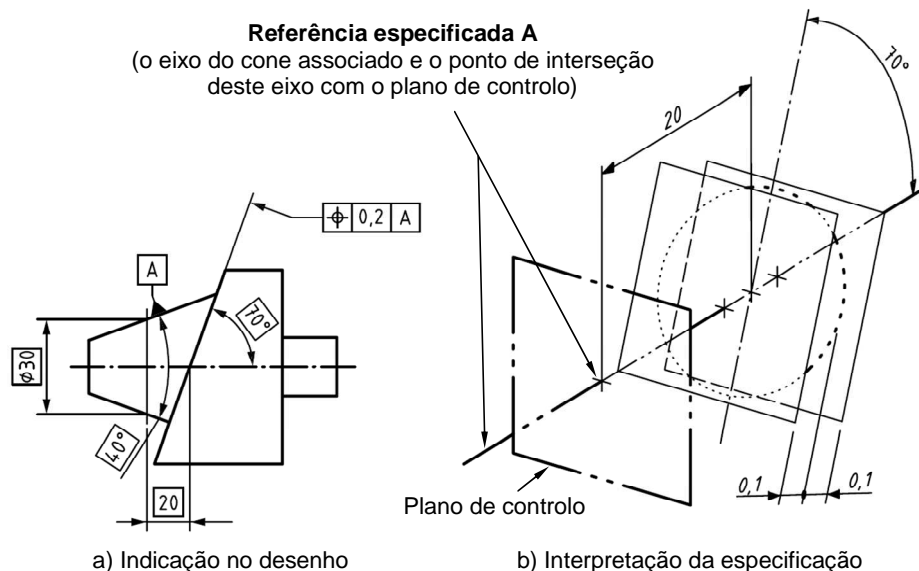


Figura 7.85 – Exemplo de uma zona de tolerância com restrições de orientação e de posição em relação a uma referência especificada. Adaptada da norma ISO 5459

Neste segundo exemplo, a zona de tolerância está sujeita a uma restrição de orientação, por meio do ângulo teoricamente exato de 70°, em relação ao eixo do cone, e a uma restrição de posição, através da distância teoricamente exata de 20 mm, em relação ao plano de controlo correspondente à secção

reta do cone, de diâmetro teoricamente exato  $\varnothing 30$  mm. A referência especificada é constituída pelo conjunto de elementos de situação do cone com um ângulo fixo de  $40^\circ$  (o eixo do cone e o ponto de interseção deste com o plano de controlo).

Por omissão, uma referência especificada elimina (restringe) todos os graus de liberdade (“*degrees of freedom*” – DOF) da zona de tolerância que pode eliminar, em função da sua configuração, e que

- são requeridos pela característica geométrica indicada no indicador de tolerância, e
- não foram ainda eliminados pela(s) referência(s) especificada(s) precedentes, no sistema de referências especificadas.

Na figura 7.86, pode observar-se um exemplo da restrição (eliminação) sucessiva de graus de liberdade (GDL) de uma peça, em conformidade com a ordem de prioridade dos elementos de referência assinalados nos compartimentos da secção de “referências especificadas”, do indicador de uma tolerância de localização inscrita no desenho.

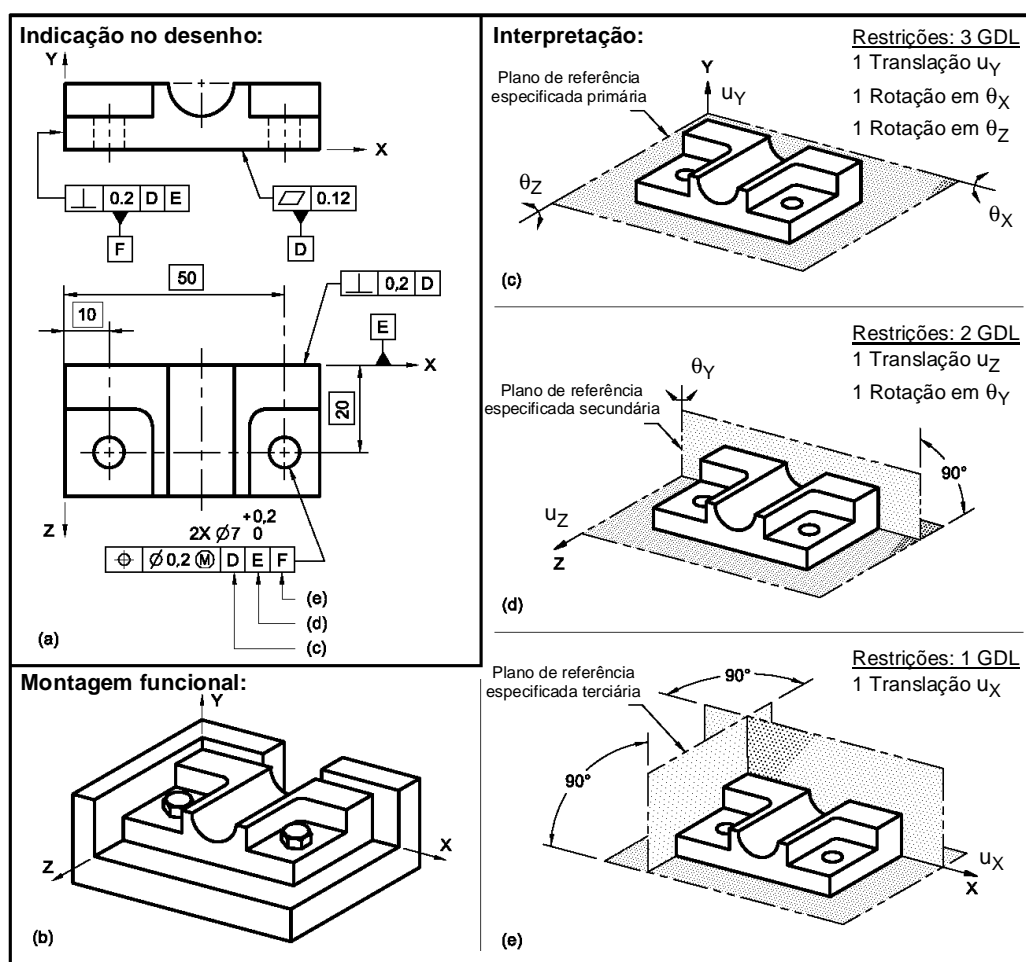


Figura 7.86 – Sequência de elementos de referência que relacionam a peça com um sistema de referências especificadas. Adaptada da ASME Y14.5

Quando uma referência especificada elimina unicamente graus de liberdade de orientação (ângulos), tal é indicado pelo modificador  $\times$  (ver figura 7.87). Este símbolo deve ser omitido quando a

característica geométrica controla apenas a orientação do elemento toleranciado (p. ex. através de uma especificação de paralelismo).

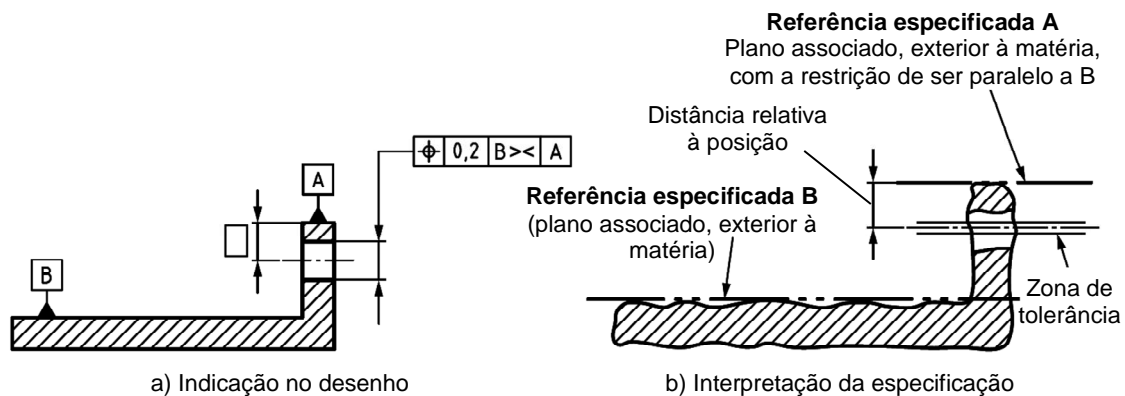


Figura 7.87 – Exemplo de uma referência especificada com o símbolo modificador  $\times$ . Adaptada da ISO 5459

Neste exemplo, o modificador  $\times$  permite que a referência especificada B restrinja apenas os graus de liberdade de orientação da zona de tolerância e não os de translação, que são controlados pela referência especificada A.

As **Referências especificadas** (“*datums*”) e os **sistemas de referências especificadas** (“*datum systems*”) são elementos geométricos teoricamente exatos (ponto, linha reta e/ou plano) utilizados em conjunto com dimensões teoricamente exatas implícitas ou explícitas. Uma **referência especificada** é constituída por um conjunto de **elementos de situação** relativos a um elemento ideal (elemento de forma perfeita). Este elemento ideal é um **elemento associado** que é estabelecido a partir dos **elementos de referência** (“*datum features*”) identificados de uma peça. Os elementos de referência são elementos integrais reais (não ideais) que poderão ser elementos completos ou porções identificadas destes (ver secções 7.3.5 e 7.8.5). Um **sistema de referências especificadas** é constituído por duas ou mais referências especificadas.

A classificação dos elementos geométricos ideais, baseada na noção de simetria, abordada na secção 4.3.2.1 deste texto, constitui uma base científica para a definição de “referências especificadas” [S6]. De acordo com a ISO 5459:2011, o **tipo** geométrico dos elementos associados, estabelecidos a partir dos elementos de referência, pertence a uma das seguintes **sete classes de invariância**:

- **esférica** (p. ex. uma esfera);
- **plana** (p. ex. um plano);
- **cilíndrica** (p. ex. um cilindro);
- **helicoidal** (p. ex. uma superfície roscada);
- **de revolução** (p. ex. um cone ou um toro);
- **prismática** (p. ex. um prisma);
- **complexa** (p. ex. uma superfície de forma livre).

As superfícies helicoidais, enquanto tais, não são consideradas nesta norma. São vistas antes como superfícies cilíndricas porque, na maioria dos casos funcionais onde estão envolvidas superfícies helicoidais (roscas, inclinações da hélice, parafuso sem-fim, etc.), a rotação e a translação combinadas da hélice não são necessárias para efeitos de referências especificadas. Nesses casos, a referência especificada é estabelecida a partir da superfície cilíndrica primitiva (ou nos flancos), mas pode também ser considerada e especificada a superfície cilíndrica maior (MD) ou a menor (LD). Por natureza, o elemento de situação de um elemento pertencente à classe de invariância helicoidal é uma hélice mas, para estes fins, considera-se apenas o seu eixo de revolução.

Cada elemento geométrico simples ou de coleção (elemento composto) pertence a uma classe de invariância (ver quadro 4.5, da secção 4.3.2.1). O termo “**grau de invariância**”, utilizado em geometria, corresponde ao “grau de liberdade não restringido” (movimento de corpo rígido) utilizado em cinemática. Logo, o número de graus de invariância é igual ao número de graus de liberdade não restringidos para um dado elemento geométrico.

Quando um elemento ideal  $E_i$  é utilizado para estabelecer uma referência especificada, esse elemento deve restringir ou eliminar alguns graus de liberdade da zona de tolerância. O número máximo de graus de liberdade que podem ser restringidos (**GDLR**) é dado pela expressão:

$$\text{GDLR} \leq 6 - \text{NID}(E_i) \quad (7.3)$$

em que  $\text{NID}(E_i)$  é o número de graus de invariância (“*number of invariance degrees*”) do elemento  $E_i$ .

Quando uma referência especificada ou um sistema de referências especificadas é assinalado num indicador de tolerância, o número de graus de liberdade não restringidos, da zona de tolerância, que são deixados livres, é maior ou igual ao grau de invariância (NID) dessa referência especificada ou desse sistema de referências especificadas.

Na figura 7.88, apresentam-se alguns exemplos de graus de liberdade que podem ser restringidos através da especificação de elementos de referência primários simples, em conformidade com a norma ASME Y14.5:2009. Os graus de liberdade efetivamente restringidos estão dependentes do elemento de referência ser um elemento primário, secundário ou terciário.

A análise de alguns dos elementos de referência apresentados na figura 7.88, complementada com dados incluídos no quadro 4.5, da secção 4.3.2.1, permite extrair as seguintes informações:

- Para uma **superfície cilíndrica** nominal utilizada para estabelecer uma **referência especificada simples**, a superfície nominal é invariante em duas direções (uma translação e uma rotação), logo pertence à **classe de invariante “cilíndrica”** e tem um grau de invariância  $\text{NID} = 2$ . O elemento de situação utilizado para estabelecer a referência especificada a partir deste elemento é uma “linha reta” (eixo do cilindro). A indicação isolada da correspondente referência especificada, num indicador de tolerância, pode restringir até 4 graus de liberdade

( $GDLR \leq 6 - 2 = 4$ ) da zona de tolerância, mas deixará, pelo menos, dois graus de liberdade (uma translação e uma rotação) não eliminados.

TIPO DE ELEMENTO	INDICADOR DE ELEMENTO DE REFERÊNCIA (EM DESENHO)	ELEMENTO DE REFERÊNCIA	ELEMENTOS DE SITUAÇÃO	REFER. ESPECIFICADA E GRAUS DE LIBERDADE A RESTRINGIR (GDLR)
PLANO			 Plano	NID = 3  $GDLR = 6 - 3 = 3$
DOIS PLANOS PARALELOS OPOSTOS			 Plano mediano	NID = 3  $GDLR = 6 - 3 = 3$
ESFÉRICO			 Ponto	NID = 3  $GDLR = 6 - 3 = 3$
CILÍNDRICO			 Eixo	NID = 2  $GDLR = 6 - 2 = 4$
DE REVOLUÇÃO (Cônico)			 Eixo e ponto	NID = 1  $GDLR = 6 - 1 = 5$
PRISMÁTICO (Forma extrudida linear)			 Eixo e plano mediano	NID = 1  $GDLR = 6 - 1 = 5$
COMPLEXO			 Ponto, eixo e plano mediano	NID = 0  $GDLR = 6 - 0 = 6$

Figura 7.88 – Exemplos de graus de liberdade restringidos para elementos de referência primários. Adaptada da ASME Y14.5

- Para uma **superfície cônica** nominal utilizada para estabelecer uma **referência especificada simples**, a superfície nominal é invariante apenas numa direção (uma rotação), logo pertence à **classe de invariante “de revolução”** e tem um grau de invariância de NID = 1. Os elementos de situação utilizados para estabelecer a referência especificada a partir deste elemento são uma “linha reta” (o eixo do cone) e um “ponto” (um ponto no eixo). A indicação isolada da correspondente referência especificada, num indicador de tolerância, pode restringir até 5 graus de liberdade ( $GDLR \leq 6 - 1 = 5$ ) da zona de tolerância, mas deixará, pelo menos um grau de liberdade (uma rotação) não eliminado.

- Para **duas superfícies não coaxiais, nominalmente cilíndricas com eixos paralelos**, utilizadas para estabelecer uma **referência especificada comum**, a superfície nominal da coleção é invariante apenas numa direção (uma translação), logo pertence à **classe de invariante “prismática”** (ver quadro 4.7, da secção 4.3.2.2) e tem um grau de invariância de  $NID = 1$ . Os elementos de situação utilizados em conjunto para estabelecer a referência especificada, a partir desta coleção de elementos, são uma “linha reta” (a linha mediana dos dois eixos dos cilindros associados) e um “plano” (o plano que contém os dois eixos dos cilindros associados). A indicação isolada da correspondente referência especificada, num indicador de tolerância, pode restringir até 5 graus de liberdade ( $GDLR \leq 6 - 1 = 5$ ) da zona de tolerância, mas deixará, pelo menos um grau de liberdade (uma translação) não eliminado.

Os **elementos associados** são estabelecidos a partir de elementos simples, extraídos ou reais, utilizados na constituição da referência especificada. O elemento associado pode ser definido através de uma **operação de associação** que inclui **restrições** derivadas do próprio elemento ou de outro(s) elemento(s). Os elementos de situação, que formam a referência especificada, são definidos a partir destes elementos associados. Os **métodos de associação**, por omissão, são apresentados na secção 7.8.4.3 deste texto.

Uma referência especificada pode ser estabelecida a partir de um ou mais elementos simples. No caso de se utilizar apenas um elemento simples, este constitui uma referência especificada simples. Se forem utilizados mais do que um elemento simples, estes podem ser considerados em simultâneo, para estabelecer uma referência especificada comum ou, numa ordem pré-definida, para estabelecer um sistema de referência especificada (ver secção 7.8.3 deste texto).

A referência especificada apresentada, a título de exemplo, na figura 7.89 a), é indicada como uma **referência simples** resultante de um elemento nominal, um cilindro, utilizado para orientar ou posicionar uma zona de tolerância. Para a construção da referência especificada deve executar-se a seguinte sequência de operações:

- uma **partição** para definir a superfície real integral, que corresponde ao elemento nominal [ver figura 7.89 b)];
- uma **extração** para obter o elemento integral extraído [ver figura 7.89 c)];
- uma **filtragem** (ver secção 7.8.4.2 deste texto);
- uma **associação** (ver métodos de associação, na secção 7.8.4.3 deste texto) para definir o elemento associado (cujo tipo é, neste caso, o mesmo do elemento nominal). O elemento associado [ver figura 7.89 d)] é obtido a partir da superfície não ideal (no processo de especificação) ou a partir do elemento extraído (no processo de verificação).

A referência especificada é definida como sendo o elemento de situação (o eixo) do cilindro associado [ver figura 7.89 e)]. Neste caso, o elemento derivado 7) e o elemento de situação 8) são o mesmo; no entanto, tal nem sempre é o caso.

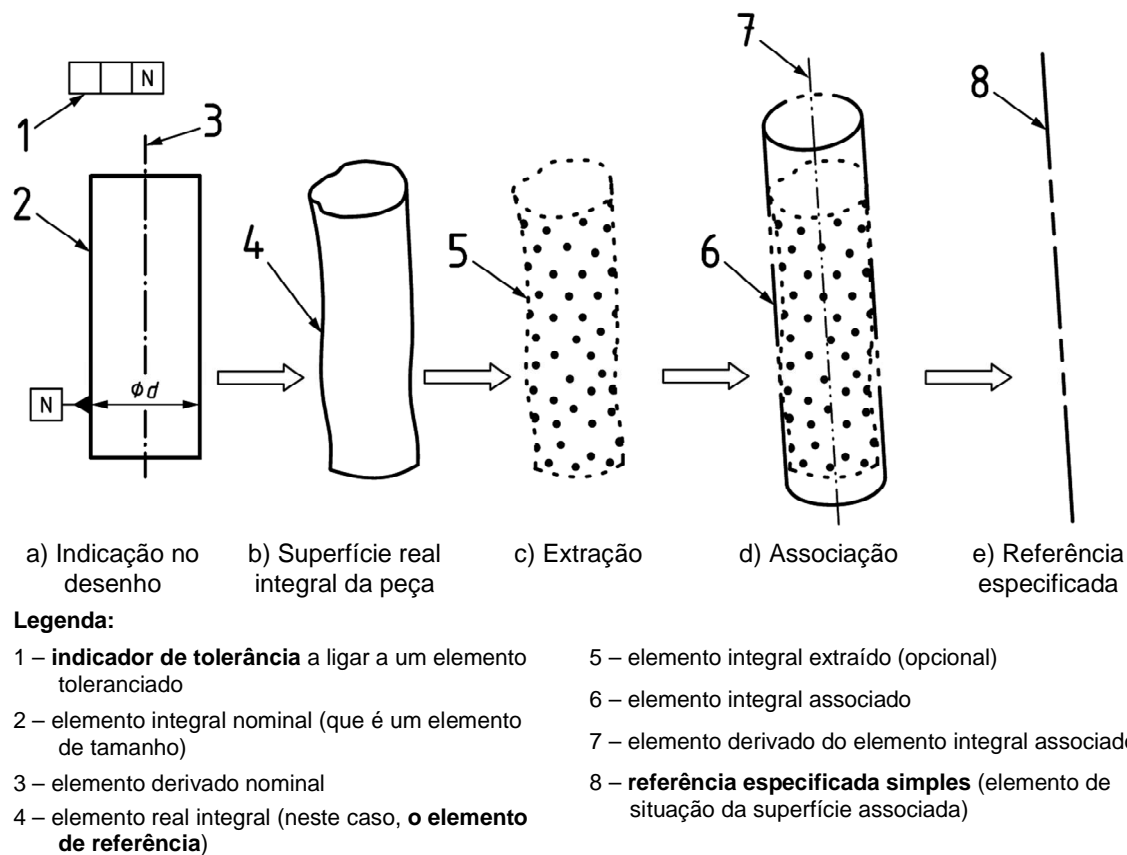


Figura 7.89 – Representação dos elementos utilizados para o estabelecimento de uma referência especificada simples, a partir de um cilindro. Adaptada da ISO 5459

Em termos gerais, as referências especificadas devem ser assinaladas nos desenhos através de “**indicadores de elementos de referência**”, de acordo com as regras já apresentadas na secção 7.3.5 deste texto. Por sua vez, as indicações sobre “referências especificadas e sistemas de referências especificadas” são englobadas na terceira secção do indicador de tolerância, em conformidade com a secção 7.4.1.3.

## 7.8.2 Características intrínsecas de superfícies associadas a elementos de referência

Por omissão, as **restrições** das **características intrínsecas** (parâmetros da equação paramétrica de um elemento ideal) de superfícies associadas a elementos de referência podem ser consideradas **variáveis ou fixas (teoricamente exatas)**, conforme os casos. Para referências especificadas com condições virtuais, ver a ISO 2692.



### 7.8.2.1 Características intrínsecas numa referência especificada simples estabelecida a partir de um elemento simples

As restrições das características intrínsecas de um elemento de tamanho simples são, por omissão, consideradas **variáveis**, para tamanhos lineares, mas **teoricamente exatas** (fixas), para dimensões angulares ou para dimensões que não sejam tamanhos (ver quadro 7.11 e figura 7.117).

Quadro 7.11 – Estado por omissão de características intrínsecas de elementos de tamanho (ISO 5459)

Elemento de tamanho	Classe de invariância	Características intrínsecas	Estado, por omissão
Cilindro	cilíndrica	diâmetro	variável
Esfera	esférica	diâmetro	variável
Dois planos paralelos opostos	plana	distância entre os dois planos	Variável
Cone	de revolução	ângulo	Teoricamente exata
Cunha	prismática	ângulo	Teoricamente exata

Por sua vez, as características intrínsecas teoricamente exatas podem ser explícitas, identificadas através de dimensões teoricamente exatas (TED) ou implícitas. As dimensões teoricamente exatas implícitas só podem ter os seguintes valores: 0 mm, 0°, 90°, 180° e 270°.

A título de exemplo, num **cone**, por omissão, o ângulo é considerado como teoricamente exato [ver figuras 7.84, 7.85 e 7.117 c)]. Num **toro**, por omissão, o diâmetro da secção reta (geratriz) é considerado como variável (tamanho do toro), mas o diâmetro da circunferência mediana (diretriz) deverá ser considerado teoricamente exato.

### 7.8.2.2 Características intrínsecas numa referência especificada comum estabelecida simultaneamente a partir de dois ou mais elementos simples

As características intrínsecas de cada elemento associado, que estabelece a referência especificada comum, devem ser consideradas conforme indicado na secção anterior. As características intrínsecas introduzidas pela **coleção de elementos** (que definem a relação entre os elementos associados) devem, por omissão, ser consideradas **teoricamente exatas** tanto para as dimensões lineares como para as angulares.

Assim, por exemplo, considere-se uma referência especificada comum estabelecida a partir de **dois cilindros paralelos não coaxiais** (classe de invariância **prismática**), ver figura 7.92 c). Cada cilindro individual tem uma característica intrínseca, o seu **diâmetro**. A coleção de elementos tem também características intrínsecas: **dois ângulos nulos** (0°) [entre os dois eixos, no plano por eles definido, e entre as suas projeções ortogonais, num plano perpendicular àquele], introduzidos como restrições de orientação (paralelismo), e a **distância** entre os dois eixos (ver a secção 4.4.4). Os dois diâmetros dos cilindros são considerados, por omissão, variáveis e os ângulos de rotação (implícitos) e a distância entre os dois eixos são considerados teoricamente exatos [ver figura 7.118 d)].

### 7.8.2.3 Características intrínsecas em sistemas de referências especificadas estabelecidos numa sequência definida a partir de dois ou mais elementos simples

As características intrínsecas de cada elemento associado, que estabelece o sistema de referências especificadas, devem ser consideradas conforme indicado na secção 7.8.2.1. As características intrínsecas introduzidas pela **coleção de elementos** (que definem a relação entre os elementos associados) devem, por omissão, ser consideradas **variáveis** para as dimensões lineares, mas **teoricamente exatas** para as dimensões angulares (ver figura 7.119).

## 7.8.3 Referências especificadas simples, referências especificadas comuns e sistemas de referências especificadas

Quando uma superfície simples ou uma coleção de superfícies é identificada como um **elemento de referência**, os graus de invariância para os quais a superfície é invariante devem ser identificados e comparados com os quadros 4.5 e 4.6, da secção 4.3.2.1, com vista a determinar o conjunto de elemento(s) de situação (ponto, linha reta, plano, ou uma combinação destes) que constitui a referência especificada.

### 7.8.3.1 Referências especificadas simples

Uma **referência especificada simples** (“*single datum*”) é composta por um ou mais elemento(s) de situação, derivado(s) de um elemento simples ou de uma porção deste (ver exemplos na figura 7.90).

Uma referência especificada simples considerada a partir do **cone**, por exemplo, tem dois elementos de situação: o seu eixo e um ponto desse eixo (ver figura 7.85).

Se uma referência especificada simples for utilizada como a única referência especificada, num indicador de tolerância, ou se for a referência primária, num sistema de referências especificadas, o **elemento associado** ao elemento real integral (ou às porções deste) utilizado para o estabelecimento da referência especificada é obtido sem restrições externas de orientação ou de posição.

Relativamente às restrições aplicadas quando uma referência especificada simples é utilizada como “referência especificada secundária” ou “referência especificada terciária”, ver a secção 7.8.3.3. Na figura 7.117, apresentam-se exemplos adicionais de referências especificadas simples.

Para um elemento de tamanho constituído por dois planos paralelos opostos, a coleção de superfícies, associada às superfícies (ou às porções das superfícies), utilizada para estabelecer a referência especificada, é obtida com uma restrição interna de orientação; as superfícies associadas (constituintes da coleção de superfícies) são definidas individualmente com uma restrição interna de paralelismo e uma restrição de característica intrínseca variável [ver figura 7.117 g)].

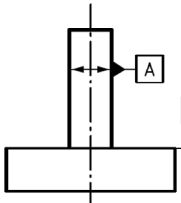

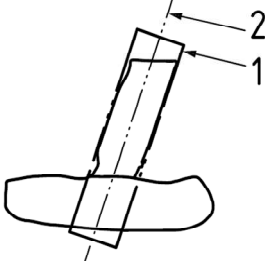
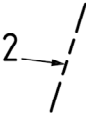


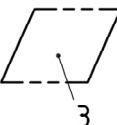
Indicação do elemento de referência	Identificação da referência especificada no indicador da tolerância	Significado na peça	Classe de tolerância e elemento de situação	Referência especificada
	a) 		Cilíndrica  Eixo do cilindro associado	
	b) 		Plana  Plano associado	
<b>Legenda:</b> 1 Elemento associado (sem restrição de orientação). 2 Linha reta, que é o elemento de situação do cilindro associado (o seu eixo). 3 Plano, que é o elemento de situação do plano associado (o próprio plano associado). <b>NOTA:</b> A associação para referências especificadas simples é descrita na secção 7.8.4.3.1.				

Figura 7.90 – Exemplos de referências especificadas simples estabelecidas a partir de um cilindro ou de um plano. Adaptada da ISO 5459

Não se deve indicar uma referência especificada secundária, quando esta não restringe mais graus de liberdade da zona de tolerância do que a referência especificada primária. Do mesmo modo, não se deve indicar uma referência especificada terciária, quando esta não restringe mais graus de liberdade da zona de tolerância do que as referências especificadas primária e secundária.

### 7.8.3.2 Referências especificadas comuns

Uma **referência especificada comum** (“*common datum*”) é composta por um ou mais elementos de situação, estabelecidos tendo em conta a coleção das superfícies consideradas [ver exemplos nas figuras 7.91 c) e 7.92 c)].

Se a **referência especificada comum** for utilizada como a única referência especificada num indicador de tolerância, ou se for a referência primária num sistema de referências especificadas, a **coleção de elementos associados**, utilizada para o estabelecimento de referências especificadas, é obtida sem restrições externas de orientação ou de posição. Logo, as superfícies (que constituem a coleção de superfícies) são associadas em conjunto, simultaneamente [ver exemplos nas figuras 7.91 c) e 7.92 c)]. Relativamente às restrições que são aplicadas quando uma referência especificada comum é utilizada como uma “referência especificada secundária” ou uma “referência especificada terciária”, ver secção a 7.8.3.3.

Não se deve indicar uma referência especificada secundária, quando esta não restringe mais graus de liberdade da zona de tolerância do que a referência especificada primária. Do mesmo modo, não se deve indicar uma referência especificada terciária, quando esta não restringe mais graus de liberdade da zona de tolerância do que as referências especificadas primária e secundária.

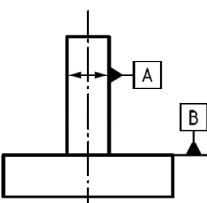
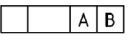
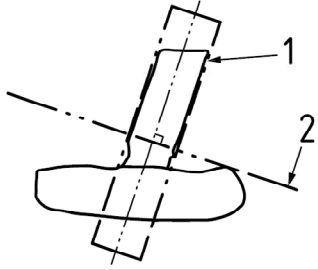
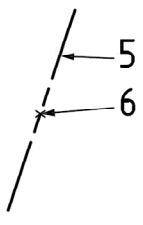
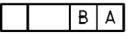
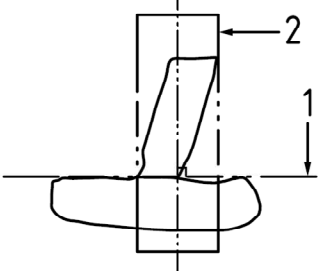
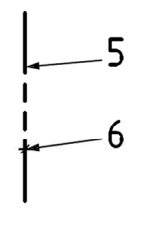
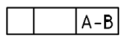
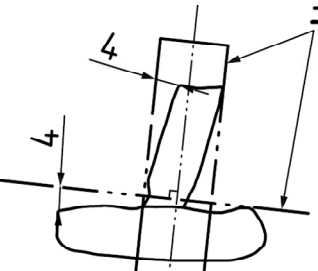
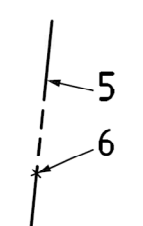
Indicação do elemento de referência	Identificação da referência especificada no indicador da tolerância	Significado na peça	Refer. especificada comum ou sist. de referências especificadas resultantes
	 a)		
	 b)		
	 c)		
<b>Legenda:</b> 1 Primeiro elemento associado, sem restrição de orientação. 2 Segundo elemento associado, com restrição de orientação em relação ao 1º elemento associado. 3 Elementos associados simultaneamente, com restrições de orientação e de posição. 4 Distância máxima equilibrada entre os elementos associados e os elementos de referência. 5 Linha reta, que é o elemento de situação do cilindro associado (o seu eixo). 6 Ponto de interseção entre a linha reta e o plano.			
<b>NOTA 1:</b> A orientação e a posição de referências especificadas são diferentes, dependendo das inscrições de referências especificadas no indicador de tolerância. <b>NOTA 2:</b> A associação para sistemas de referências especificadas é descrita na secção 7.8.4.3.3.			

Figura 7.91 – Exemplos de uma referência especificada comum e de dois sistemas de referências especificadas estabelecidos a partir de um cilindro e de um plano. Adaptada da ISO 5459

As figuras 7.91 e 7.92 ilustram a diferença entre uma referência especificada comum (com a associação simultânea dos seus elementos constituintes) e um sistema de referências especificadas (com uma associação sequencial dos seus elementos constituintes). A inscrição complementar do símbolo modificador [DV] de “distância variável”, no seguimento das letras que identificam uma

referência especificada comum, num indicador de tolerância, significa que as dimensões lineares entre os elementos de situação são variáveis, ver secção 7.8.4.4.

### 7.8.3.3 Sistemas de referências especificadas

Um sistema de referências especificadas (*"datum system"*) é constituído por uma sequência ordenada de duas ou três referências especificadas simples ou comuns e consiste em dois ou três elementos de situação, resultantes da coleção das superfícies consideradas (ver exemplos nas figuras 7.91, 7.92 e 7.93).

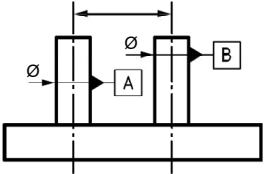
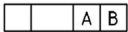
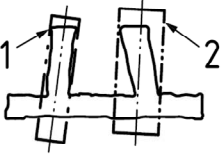
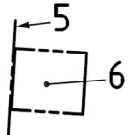
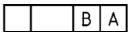

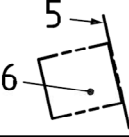
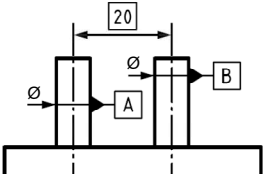
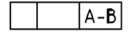
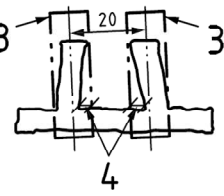
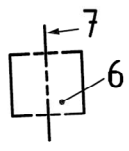
Indicação do elemento de referência	Identificação das referências especificadas no indicador da tolerância	Significado na peça	Referência especificada ou sist. de referências especificadas resultantes
	 a)		
	 b)		
	 c)		
<b>Legenda:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Primeiro cilindro associado, sem restrição.</li> <li>2 Segundo cilindro associado, com restrição de paralelismo em relação ao 1º elemento associado.</li> <li>3 Cilindros associados simultaneamente, com restrição de paralelismo e restrição de posição.</li> <li>4 Distância máxima considerada entre os cilindros associados e os elementos de referência.</li> <li>5 Linha reta, que é o eixo do primeiro cilindro associado.</li> <li>6 Plano, que inclui os eixos dos dois cilindros associados.</li> <li>7 Linha reta mediana dos eixos dos dois cilindros associados simultaneamente.</li> </ol> <p><b>NOTA 1:</b> A orientação e a posição de referências especificadas são diferentes, dependendo da inscrição da referência especificada no indicador de tolerância. Nem todas as possibilidades de estabelecimento de referências especificadas foram cobertas.</p> <p><b>NOTA 2:</b> Para o método de associação, ver secção 7.8.4.3.</p>			

Figura 7.92 – Exemplos de uma referência especificada comum e de dois sistemas de referências especificadas estabelecidos a partir de dois cilindros. Adaptada da ISO 5459

Os elementos associados, utilizados para o estabelecimento do sistema de referências especificadas, são derivados sequencialmente, na ordem definida pela especificação geométrica. A orientação relativa das superfícies associadas é teoricamente exata, mas a sua posição relativa é variável.

Esta ordem define as **restrições de orientação** para a operação de associação: a referência especificada primária impõe restrições de orientação às referências especificadas secundária e

terciária; a referência especificada secundária impõe restrições de orientação à referência especificada terciária.

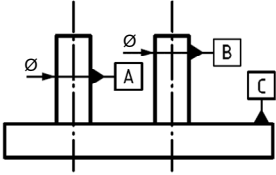
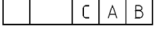
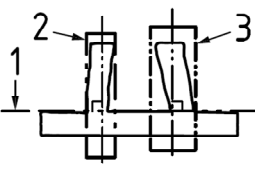
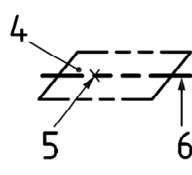
Indicação do elemento de referência	Identificação das referências especificadas no indicador da tolerância	Significado na peça	Referência especificada ou sist. de referências especificadas resultantes
			
<b>Legenda:</b> 1 Primeiro elemento associado, sem restrição. 2 Segundo elemento associado, com uma restrição de perpendicularidade em relação ao 1º elemento associado. 3 Terceiro elemento associado, com uma restrição de perpendicularidade em relação ao 1º elemento associado (e uma restrição de paralelismo em relação ao segundo). 4 Plano, que é o primeiro elemento associado. 5 Ponto de interseção entre o plano e o eixo do segundo elemento associado. 6 Linha reta, que é a interseção entre o plano associado e o plano que contém os dois eixos.			
<b>NOTA:</b> Para o método de associação, ver secção 7.8.4.3.			

Figura 7.93 – Exemplo de um sistema de referências especificadas estabelecido a partir de dois cilindros e um plano. Adaptada da ISO 5459

Deve indicar-se uma referência especificada secundária, apenas quando esta é necessária para restringir mais graus de liberdade da zona de tolerância do que os que são restringidos pela referência especificada primária. De igual modo, deve indicar-se uma referência especificada terciária, apenas quando a mesma é necessária para restringir mais graus de liberdade da zona de tolerância do que os que são restringidos pelas referências especificadas primária e secundária.

Em 2014, Concheri [C3] assinalava o facto da Dassault Systems afirmar que um dos seus objetivos, a curto prazo, era o desenvolvimento do sistema de CAD CATIA com vista a permitir a aplicação da semântica da norma ISO 5459:2011.

#### 7.8.4 A secção de “referências especificadas” do indicador de tolerância

Os componentes de especificação que podem ser utilizados na **secção de “referências especificadas”** do indicador de tolerância estão indicados na figura 7.94. Esta figura mostra também o agrupamento e a sequência em que estes componentes de especificação devem ser inscritos.

Tipo	Filtro		Associação	Restrição	Elemento derivado	Condição de matéria
	Tipo	Índices				
A	G	0,8	C CE CEH CI	[PT] [CF]	Ⓟ	Ⓜ
B-B	S	50	G GE GEH GI	[PL] [DV]		Ⓛ
B-C	W	etc.	X	[SL] ><		
D-E-F	RG		N			
etc.	RS	etc.				
	etc.					
1	2a	2b	3	4	5	6

**NOTA:** a lista de símbolos modificadores poderá vir a ser alargada.

Figura 7.94 – Componentes de especificação na secção de “referências especificadas” do indicador de tolerância. Adaptada do ISO 1101:2012/DAM 1

#### 7.8.4.1 Tipos de referências especificadas (coluna 1 da figura 7.94)

Nas secções 7.4.1.3 e 7.3.5 deste texto, apresentaram-se as regras de base para a indicação de referências especificadas, quer no “indicador de tolerância”, quer no “indicador de elemento de referência”. As referências especificadas podem ser simples (ver exemplos na figura 7.95) ou comuns (ver exemplos na figura 7.96).

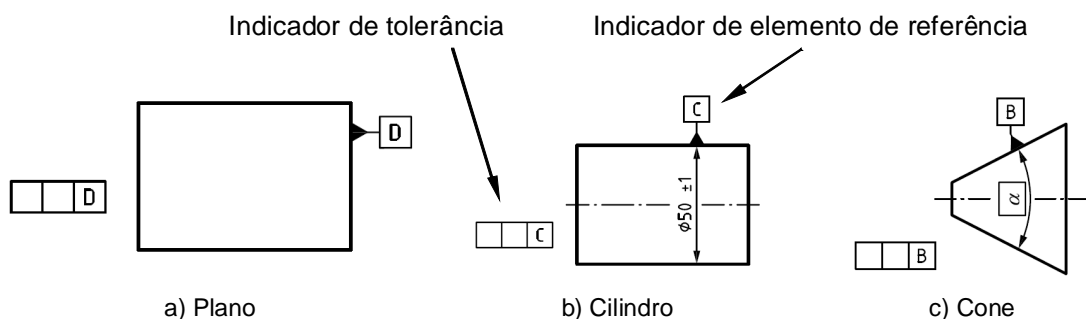


Figura 7.95 – Exemplos de indicação, no desenho, de referências especificadas simples. Adaptada da ISO 5459

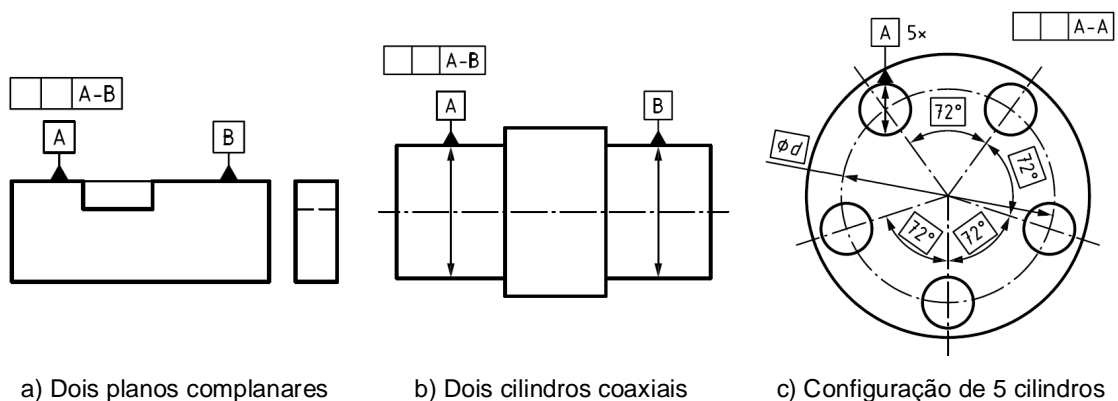


Figura 7.96 – Exemplos de indicação, no desenho, de referências especificadas comuns. Adaptada da ISO 5459

A partir do agrupamento de dois ou mais elementos de referência, numa ordem específica, podem também ser constituídos sistemas de referências especificadas (ver exemplos na figura 7.97).

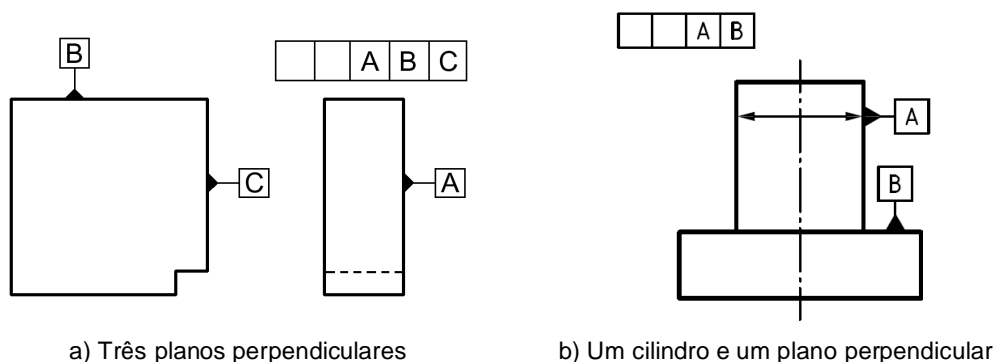


Figura 7.97 – Exemplos de indicação no desenho de sistemas de referências especificadas. Adaptada da ISO 5459

Os componentes de especificação de filtros e/ou o componente de especificação do elemento associado ao elemento de referência (ver figura 7.94) devem ser indicados, entre parêntesis retos, após a(s) respetiva(s) letra(s) de referência, separados por um espaço, no caso de serem indicados em simultâneo. Os restantes componentes são indicados sequencialmente, sem espaços entre eles.

No caso de uma **referência especificada simples**, estes componentes podem ser indicados, em alternativa, quer no “indicador de tolerância”, quer no “indicador de elemento de referência” (ver exemplo na figura 7.98). Neste exemplo de especificação, a referência especificada simples D é um plano em que o elemento de referência deve começar por ser filtrado através de um filtro spline com um valor de corte de 0,8 mm em ambas as direções. Em seguida, a referência especificada deve ser associada como o elemento dos mínimos quadrados (Gauss), com a restrição de ser exterior à matéria.

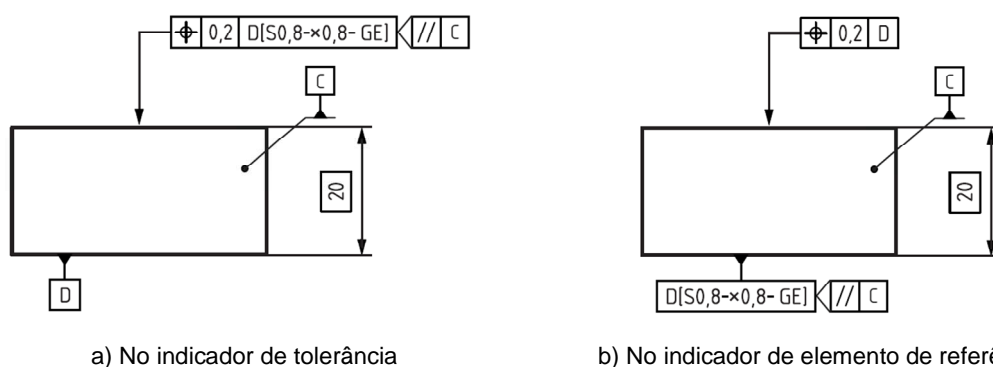


Figura 7.98 – Exemplos de indicações alternativas, no desenho, de um operador de especificação especial para uma referência especificada simples. Adaptada do ISO 1101:2012/DAM 1

No caso de uma **referência especificada comum**, em que um dado conjunto de componentes de especificação se aplica a todos os seus elementos de referência constituintes, as letras da referência especificada comum devem ser colocadas entre parêntesis curvos (ver figura 7.99).



Na figura 7.99 a), está indicada uma tolerância de paralelismo do eixo de um furo cilíndrico em relação a uma referência especificada comum (D-E), em que se aplicam os mesmos componentes de especificação (filtragem e associação) a ambos os elementos de referência e onde apenas deve ser tido em consideração o elemento de situação [SL] da referência especificada (D-E), correspondente à “linha reta” mediana dos eixos dos dois cilindros associados aos elementos de referência D e E.

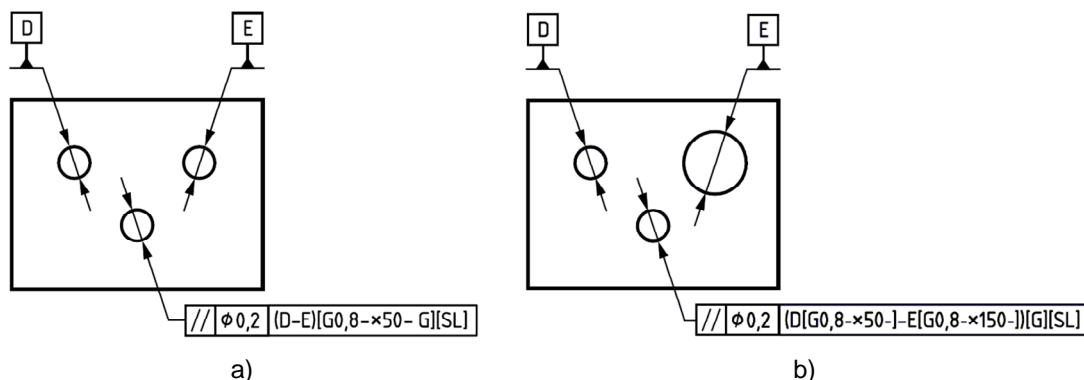


Figura 7.99 – Exemplos de indicação, no desenho, de operadores de especificação especiais para referências especificadas comuns. Adaptada do ISO 1101:2012/DAM 1

Por sua vez, na figura 7.99 b), apresenta-se também uma tolerância de paralelismo em relação a uma referência especificada comum, mas em que são diferentes os componentes de especificação da filtragem, aplicados a cada um dos seus elementos de referência.

#### 7.8.4.2 Componentes de especificação de filtros (colunas 2a e 2b da figura 7.94)

Em termos de referências especificadas, a operação de **filtragem** (“*filtration*”) deve conservar os pontos mais elevados no elemento integral real. De acordo com a norma ISO 5459, para um elemento nominalmente plano ou convexo, como p. ex. um veio, a filtragem deve dar origem a um elemento convexo – o elemento envolvente (“*hull feature*”), ver figura 7.100 a). Para outros tipos de elementos nominais, como p. ex. um furo, as cavidades na superfície devem ser igualmente removidas, ver figura 7.100 b). O método da envolvente (“*hull method*”) é pois o método de filtragem, por omissão, considerado na ISO 5459:2011. Complementarmente, nas figuras 7.137 e 7.141, podem observar-se os resultados da aplicação deste tipo de filtros em dois perfis de superfície abertos e distintos.

Tal como para o elemento toleranciado (ver ponto 1, da secção 7.4.1.2.2), a indicação de um filtro é um componente de especificação opcional. A filtragem especificada para o elemento de referência deve ser indicada através de uma combinação de dois componentes. Um assinala o tipo de filtro especificado e o outro indica o índice de imbricação (“*nesting index*”). Com elementos de referência, apenas podem ser utilizados **filtros passa-baixo**, que deixam passar as baixas frequências, isto é, que deixam passar os comprimentos de onda longos (“*long wave pass filter*”), ver ISO 1101:2012/DAM 1.

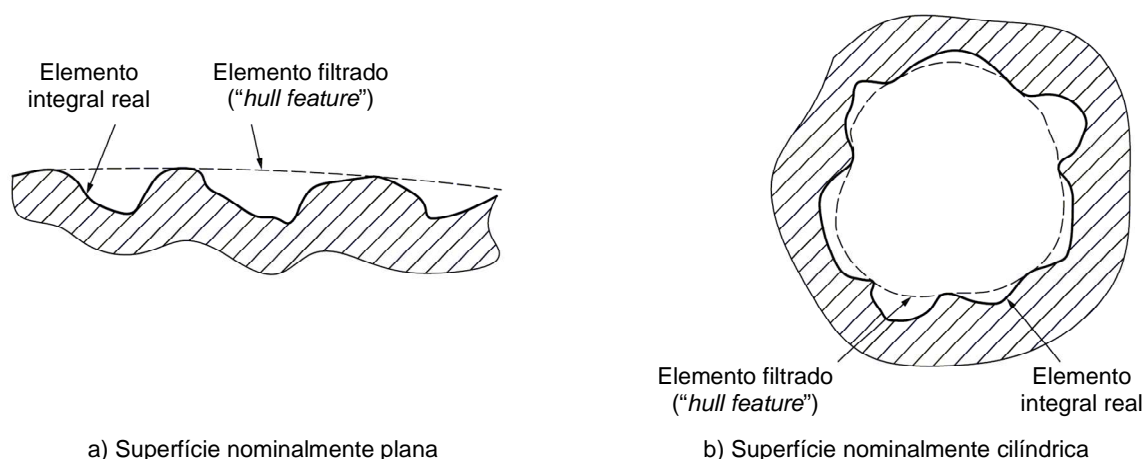


Figura 7.100 – Representação de operações de filtragem aplicadas a superfícies reais. Adaptada da ISO 5459

Os símbolos utilizados para designar os filtros normalizados são os indicados no quadro 7.5. Os índices de imbricação e o seu significado para cada tipo de filtro são os já apresentados no quadro 7.6. As regras para a indicação de filtros em elementos de referência são idênticas às regras, anteriormente descritas, para a indicação de filtros em elementos toleranciados.

Os **filtros gaussianos** e os **filtros splines**, que podem atenuar fortemente ou mesmo eliminar os pontos mais proeminentes da superfície, com influência nos aspetos de contacto (ver figura 7.127), não são adequados para elementos geométricos utilizados como referências especificadas [H1, L2].

Os **filtros morfológicos de fecho** (ver secção 7.9.3.1), que conservam os pontos mais proeminentes da superfície e eliminam os vales estreitos onde a esfera ou o disco não pode penetrar, poderão ser utilizados em referências especificadas [S4, H1, S5].

Na figura 7.101, são visíveis duas indicações alternativas de uma referência especificada simples constituída por um plano, em que o elemento de referência deve ser filtrado através de um filtro onduleta spline (*spline wavelet*) com um valor de corte de 0,25 mm em ambas as direções. Estes componentes de especificação tanto podem ser inscritos na secção de “referências especificadas” do indicador de tolerância como no “indicador de elemento de referência”.

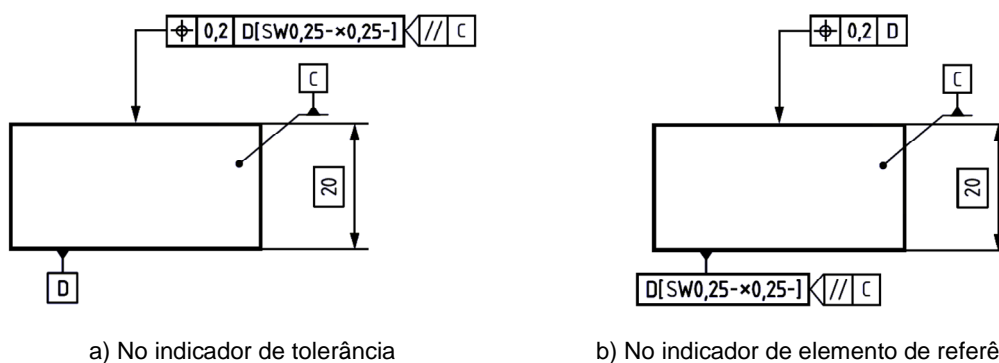


Figura 7.101 – Exemplos de indicações alternativas, no desenho, dos componentes de especificação de filtragem para uma referência especificada simples. Adaptada do ISO 1101:2012/DAM 1

Na secção 7.9.3 deste texto, a operação de filtragem é abordada de um modo mais desenvolvido, no âmbito dos operadores de especificação de características geométricas de forma.

#### 7.8.4.3 Componente de especificação do método de associação para a referência especificada (coluna 3 da figura 7.94)

Os **métodos de associação** (*“association methods”*) para referências especificadas relacionam os elementos reais com as referências especificadas e com um conjunto inequívoco de restrições que conduzem à identificação de referências especificadas ou sistemas de referências especificadas únicos (ISO 5459).

O critério de associação por omissão (função objetivo com ou sem restrições), utilizado no ajustamento de referências especificadas, destina-se a simular o contacto entre uma superfície que tem uma forma perfeita e a superfície não ideal. Essa superfície perfeita de contacto é, por omissão, do mesmo tipo que a superfície nominal. Há casos em que a superfície associada, utilizada para estabelecer a referência especificada, não é do mesmo tipo do elemento de referência nominal (p. ex. na simulação dos elementos de contacto, ver as secções 7.8.4.4 e 7.8.5).

Os elementos associados, utilizados para estabelecer as referências especificadas ou sistemas de referências especificadas, simulam o contacto com os elementos integrais reais, de modo a assegurar que o elemento associado seja exterior à matéria do elemento não ideal. Quando o resultado deste processo não é único, o elemento associado a considerar é aquele que minimiza a distância normal máxima entre o elemento associado e o elemento filtrado que representa o elemento real, (ver exemplos na figura 7.102).

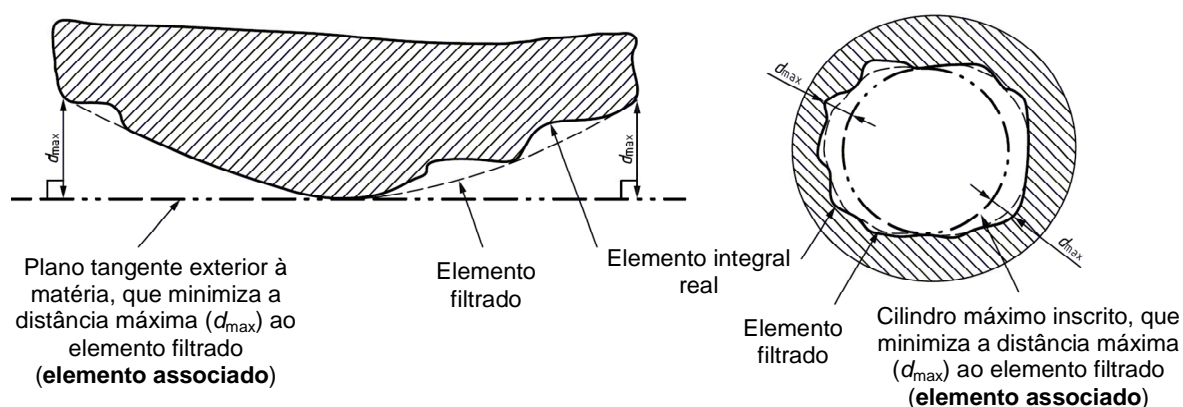


Figura 7.102 – Exemplos de elementos associados (para uma superfície plana e para uma superfície cilíndrica). Adaptada da ISO 5459

A indicação de um componente de especificação do método de associação, para a referência especificada, é opcional. Por omissão, aplicam-se os critérios de associação mencionados na ISO 5459, quando não for indicado qualquer outro componente de especificação.

#### 7.8.4.3.1 A associação de referências especificadas simples

Quando se estabelece uma referência especificada simples a partir de um elemento de tamanho e o tamanho deste é considerado variável para a associação (como, p. ex., no caso de um cilindro, uma esfera, dois planos paralelos opostos ou um toro), os critérios de associação por omissão, a adotar, devem ser os indicados no quadro 7.12.

Quadro 7.12 – Critérios de associação, por omissão, para um elemento de tamanho com características intrínsecas variáveis (ISO 5459:2011)

Indicação no desenho relativa a uma referência especificada estabelecida a partir do seguinte elemento geométrico de tipo nominal	Interior/ Exterior	Critérios de associação, por omissão, para referências especificadas simples, estabelecidas a partir de um elemento de tamanho com uma restrição de característica intrínseca variável		Elemento de situação
		Função objetivo	Restrição matéria	
Esfera	Interior	<b>Máximo inscrito:</b> Maximizar o diâmetro da esfera inscrita associada no elemento de referência <sup>a)</sup> .	Exterior à matéria	O centro da esfera associada ( <b>ponto</b> )
	Exterior	<b>Mínimo circunscrito:</b> Minimizar o diâmetro da esfera circunscrita associada no elemento de referência <sup>a)</sup> .		
Cilindro	Interior	<b>Máximo inscrito:</b> Maximizar o diâmetro do cilindro inscrito associado no elemento de referência <sup>a)</sup> .	Exterior à matéria	O eixo do cilindro associado ( <b>linha reta</b> )
	Exterior	<b>Mínimo circunscrito:</b> Minimizar o diâmetro do cilindro circunscrito associado no elemento de referência <sup>a)</sup> .		
Dois planos paralelos	Interior	<b>Máximo inscrito:</b> Maximizar a distância entre os dois planos associados, em simultâneo, aos dois elementos de referência. Estes dois planos são <u>constrangidos a serem paralelos entre si</u> <sup>a)</sup> .	Exterior à matéria	Plano mediano dos dois planos associados ( <b>plano</b> )
	Exterior	<b>Mínimo circunscrito:</b> Minimizar a distância entre os dois planos associados, em simultâneo, aos dois elementos de referência. Estes dois planos são <u>constrangidos a serem paralelos entre si</u> <sup>a)</sup> .		
Toro	Interior	<b>Máximo inscrito:</b> Maximizar o diâmetro da secção reta do toro inscrito (toro com diâmetro variável da geratriz e diâmetro fixo da diretriz, no contacto interno) associado ao elemento de referência <sup>a)</sup> .	Exterior à matéria	Plano e centro do toro associado ( <b>plano e ponto</b> )
	Exterior	<b>Mínimo circunscrito:</b> Minimizar o diâmetro da secção reta do toro circunscrito (toro com diâmetro variável da geratriz e diâmetro fixo da diretriz, no contacto externo) associado ao elemento de referência <sup>a)</sup> .		

<sup>a)</sup> Nos casos em que o tamanho linear (do elemento de tamanho) é considerado variável, o resultado da associação pode levar a várias soluções com o mesmo elemento de referência ("**associação instável**"). Neste caso, deve ser utilizado o seguinte **critério de associação alternativo**: minimizar a distância máxima, normal ao elemento associado, entre o elemento associado e o elemento de referência ou entre os dois elementos associados e os dois elementos de referência (no caso de dois planos paralelos) – o **critério do minimax**.

Quando se estabelece uma referência especificada simples a partir de um plano ou de uma superfície complexa (que não são elementos de tamanho) ou a partir de um cone ou de uma cunha (que são elementos de tamanho, com tamanho angular), os critérios de associação por omissão, a adotar, devem ser os indicados no quadro 7.13.

Quadro 7.13 – Critérios de associação, por omissão, para um elemento que não é um elemento de tamanho ou para um elemento de tamanho com características intrínsecas fixas (ISO 5459:2011)

Indicação no desenho relativa a uma referência especificada estabelecida a partir do seguinte elemento geométrico de tipo nominal	Interior/ Exterior	Critérios de associação, por omissão, para referências especificadas simples		Elemento de situação
		Função objetivo	Restrição matéria	
Cone	Interior	<b>Minimax:</b> Minimizar a distância máxima entre o cone associado e o elemento de referência, com uma restrição de característica intrínseca fixa ( <b>ângulo fixo</b> ).	Exterior à matéria	Elementos de situação do cone associado ( <b>linha reta e ponto</b> )
	Exterior			
Cunha	Interior	<b>Minimax:</b> Minimizar a distância máxima entre a cunha associada e o elemento de referência, com uma restrição de característica intrínseca fixa ( <b>ângulo fixo</b> ).	Exterior à matéria	Elementos de situação da cunha associada ( <b>plano e linha reta</b> )
	Exterior			
Superfície complexa	Não-aplicável	<b>Minimax:</b> Minimizar a distância máxima entre a superfície complexa associada com parâmetros fixos e o elemento de referência.	Exterior à matéria	Elementos de situação da superfície complexa associada ( <b>plano, linha reta e ponto</b> )
Plano	Não-aplicável	<b>Minimax:</b> Minimizar a distância máxima entre o plano associado e o elemento de referência.	Exterior à matéria	O plano associado ( <b>plano</b> )

#### 7.8.4.3.2 A associação de referências especificadas comuns

O método de associação para referências especificadas comuns requer que uma coleção de superfícies simples ideais seja ajustada, em simultâneo (numa única etapa), a várias superfícies não-ideais.

O processo de associação, para referências especificadas comuns, inclui restrições de posição e de orientação entre os diferentes elementos associados. Essas restrições correspondem às novas características intrínsecas definidas pela coleção de elementos e são definidas, quer explicitamente, através de dimensões teoricamente exatas (TEDs), quer implicitamente (restrição de orientação implícita de 0°, 90°, 180° ou 270° e restrição de posição implícita de 0 mm). As restrições internas para a associação, descritas para as referências especificadas simples, são também aplicáveis para referências especificadas comuns, mas devem ser incluídas restrições complementares (p. ex. de coplanaridade e de coaxialidade) entre os elementos associados.

O critério de associação, por omissão, é definido através de restrições e de uma função objetivo. No estabelecimento de uma referência especificada comum, a cada elemento associado incluído na coleção de superfícies definida no indicador de tolerância, aplicam-se as seguintes restrições:

- ser exterior à matéria do seu elemento filtrado correspondente;
- respeitar as restrições de orientação e posição que definem a relação entre os elementos nominais na coleção (indicadas por uma TED implícita ou explícita), tendo em conta eventuais modificadores (p. ex. [DV], ver figura 7.111).

A função objetivo consiste em minimizar a distância máxima, segundo a normal ao elemento associado, entre cada elemento associado e o seu elemento filtrado, de acordo com a expressão (7.4), respeitando, em simultâneo, as restrições por omissão (ver figura 7.103).

$$\text{minimizar} \left[ \max_{i=1, \dots, n} d(A_i, F_i) \right] \quad (7.4)$$

em que:

- $d(A_i, F_i)$  é a distância entre os elementos  $A_i$  e  $F_i$ ;
- $i$  é o índice de um elemento simples pertencente à coleção de superfícies para a referência especificada comum;
- $n$  é o número de elementos simples, constituintes da coleção de superfícies para a referência especificada comum;
- $A_i$  é o elemento associado do elemento filtrado;
- $F_i$  é o elemento filtrado do elemento integral real.

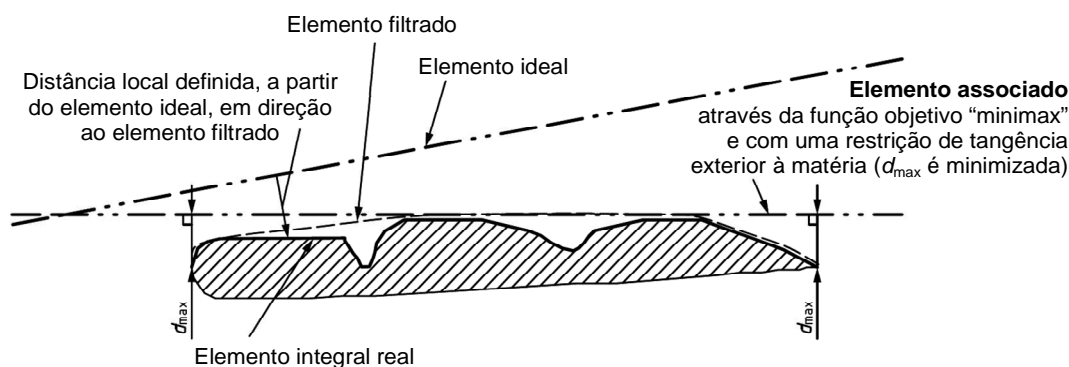


Figura 7.103 – Representação do processo de associação com uma função objetivo “minimax” e uma restrição de tangência exterior à matéria. Adaptada da ISO 5459

A figura 7.104 ilustra o processo utilizado para estabelecer uma referência especificada comum, a partir de duas superfícies nominalmente cilíndricas e coaxiais.

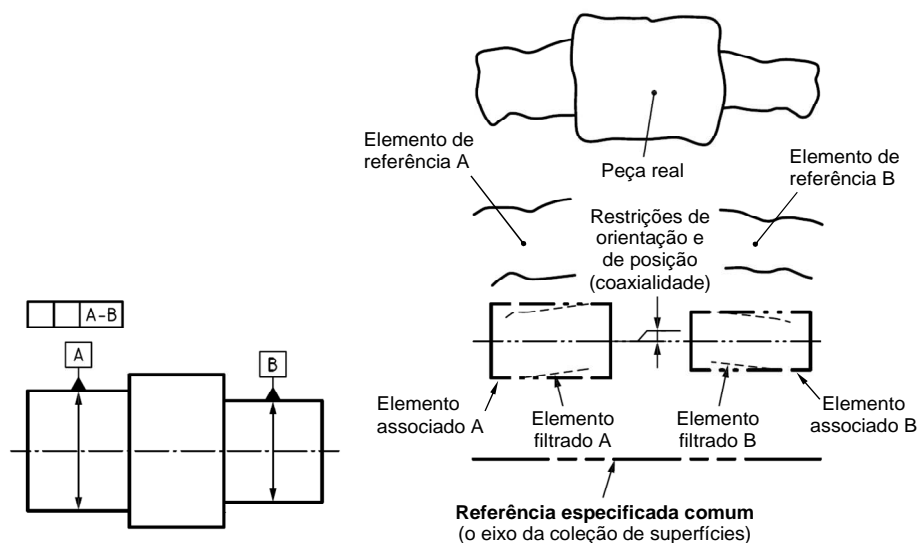


Figura 7.104 – Referência especificada comum estabelecida a partir de dois cilindros coaxiais. Adaptada da ISO 5459

Após a filtragem dos elementos integrais extraídos correspondentes aos dois elementos da coleção de superfícies, ajusta-se um elemento associado, a cada um dos elementos filtrados, com base numa função objetivo minimax, com restrições, de modo a minimizar, simultânea e globalmente, as distâncias máximas entre os elementos associados e os elementos filtrados correspondentes. Em termos de restrições, os elementos associados devem ser coaxiais, ter características intrínsecas variáveis e serem exteriores à matéria. Neste exemplo, a referência especificada comum é o eixo da coleção de superfícies, constituída pelos dois cilindros associados coaxiais.

#### 7.8.4.3.3 Associação para sistemas de referências especificadas

O método de associação para sistemas de referências especificadas requer que uma coleção de superfícies simples ideais seja ajustada, numa ordem específica, (em várias etapas) a várias superfícies não ideais.

Um sistema de referências especificadas é constituído por uma lista ordenada de duas ou três referências especificadas. Cada uma destas referências especificadas (primária, secundária e terciária) pode ser simples ou comum. O ajustamento das superfícies associadas a cada elemento de referência é realizado um após o outro, na ordem definida pelo sistema. A associação de referências especificadas secundárias e terciárias obedece às restrições criadas pelas associações precedentes.

Para além disso, são necessárias as seguintes restrições suplementares (ver figura 7.105):

- A **referência especificada primária** impõe restrições de orientação à referência especificada secundária, definidas pela orientação relativa teoricamente exata entre as referências especificadas primária e secundária.
- Se existir uma referência especificada terciária,
  - a **referência especificada primária** impõe restrições de orientação a essa referência especificada terciária, definidas pela orientação relativa teoricamente exata entre as referências especificadas primária e terciária;
  - a **referência especificada secundária** impõe restrições de orientação à referência especificada terciária, definidas pela orientação relativa teoricamente exata entre as referências especificadas secundária e terciária.

Para cada referência especificada simples ou comum, aplicam-se as correspondentes regras de associação.

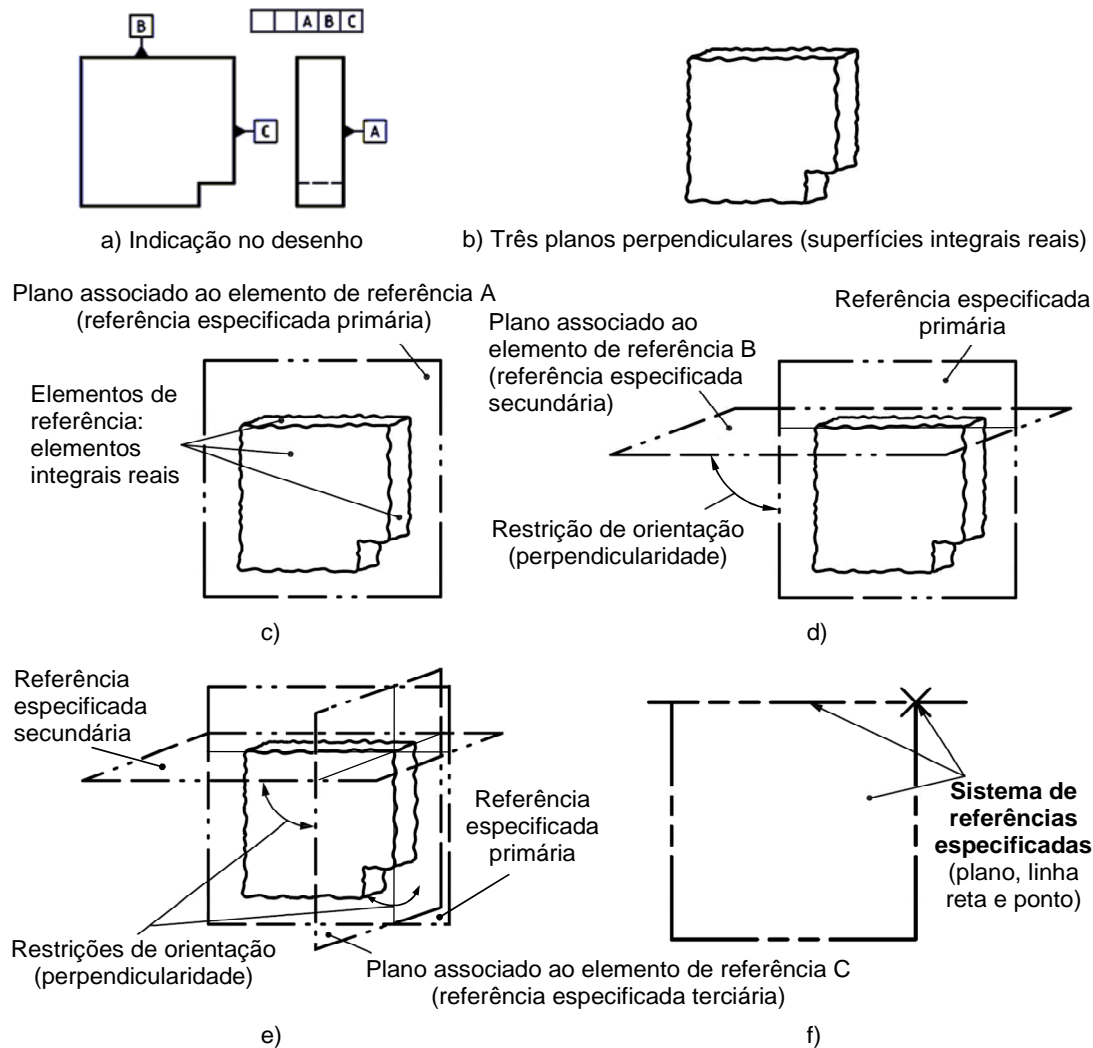


Figura 7.105 – Exemplo do estabelecimento de um sistema de referências especificadas estabelecido a partir de três planos perpendiculares. Adaptada da ISO 5459

O critério de associação, por omissão, para as referências especificadas primária, secundária ou terciária é o critério de associação, por omissão, para uma referência especificada simples ou para uma referência especificada comum, conforme adequado. No caso da referência especificada primária, a associação é realizada sem qualquer restrição adicional. Em termos da referência especificada secundária, a associação é realizada com as restrições de orientação adicionais a partir da referência especificada primária (definidas, explicitamente, através de ângulos teoricamente exatos e/ou ângulos implícitos de 0°, 90°, 180° ou 270°). No caso da referência especificada terciária, a associação é realizada com as restrições de orientação adicionais a partir das referências especificadas primária e secundária (definidas, explicitamente, através de ângulos teoricamente exatos e/ou ângulos implícitos de 0°, 90°, 180° ou 270°).



#### 7.8.4.3.4 A indicação do componente de especificação do método de associação

De acordo com o ISO 1101:2012/DAM 1, os componentes de especificação do método de associação para a referência especificada são praticamente os mesmos que foram indicados para as características geométricas de forma (ver ponto 1, da secção 7.4.1.2.3). Assim, está prevista a possibilidade de indicação dos seguintes componentes de especificação:

**Símbolo modificador C** – utilizado para indicar o método de associação minimax (Chebyshev). Minimiza a distância entre o ponto mais afastado pertencente ao elemento de referência e a referência especificada associada.

**Símbolo modificador CE** – utilizado para indicar o método de associação minimax (Chebyshev) com a restrição do elemento associado ser exterior à matéria. Minimiza a distância entre o ponto mais afastado pertencente ao elemento de referência e a referência especificada associada, mantendo esta última exterior à matéria.

**Símbolo modificador CEH** – utilizado para indicar a aplicação do método de associação minimax (Chebyshev) ao elemento envolvente (*"hull feature"*) com a restrição do elemento associado ser exterior à matéria. Este método minimiza a distância entre o ponto mais afastado pertencente ao elemento envolvente e a referência especificada associada, mantendo esta última externa à matéria. Esta é a associação, por omissão, considerada na norma ISO 5459:2011 (ver figuras 7.102 e 7.103).

**Símbolo modificador CI** – utilizado para indicar o método de associação minimax (Chebyshev) com a restrição do elemento associado ser interior à matéria. Minimiza a distância entre o ponto mais afastado pertencente ao elemento de referência e a referência especificada associada, mantendo esta última interior à matéria.

**Símbolo modificador G** – utilizado para indicar o método de associação dos mínimos quadrados (Gauss). Minimiza a soma dos quadrados dos desvios locais do elemento de referência em relação à referência especificada associada.

**Símbolo modificador GE** – utilizado para indicar o método de associação dos mínimos quadrados (Gauss) com a restrição do elemento associado ser exterior à matéria. Minimiza a soma dos quadrados dos desvios locais do elemento de referência em relação à referência especificada associada, mantendo esta última exterior à matéria.

**Símbolo modificador GEH** – utilizado para indicar a aplicação do método de associação dos mínimos quadrados (Gauss) ao elemento envolvente (*"hull feature"*) com a restrição do elemento associado ser exterior à matéria. Este método minimiza a soma dos quadrados dos desvios locais do elemento envolvente em relação à referência especificada associada, mantendo esta última exterior à matéria.

**Símbolo modificador GI** – utilizado para indicar o método de associação dos mínimos quadrados (Gauss) com a restrição do elemento associado ser interior à matéria. Minimiza a soma dos

quadrados dos desvios locais do elemento de referência em relação à referência especificada associada, mantendo esta última interior à matéria.

**Símbolo modificador X** – utilizado para indicar o método de associação do máximo inscrito. Só aplicável a elementos de tamanho. Maximiza o tamanho da referência especificada associada, ao mesmo tempo que esta se mantém totalmente no interior do elemento de referência.

**Símbolo modificador N** – utilizado para indicar o método de associação do mínimo circunscrito. Só aplicável a elementos de tamanho. Este método de associação minimiza o tamanho da referência especificada associada, ao mesmo tempo que esta se mantém totalmente no exterior do elemento de referência.

Na figura 7.106, apresenta-se um exemplo de uma especificação de coaxialidade do eixo de um cilindro em relação a uma referência especificada, associada pelo método dos mínimos quadrados (Gauss).

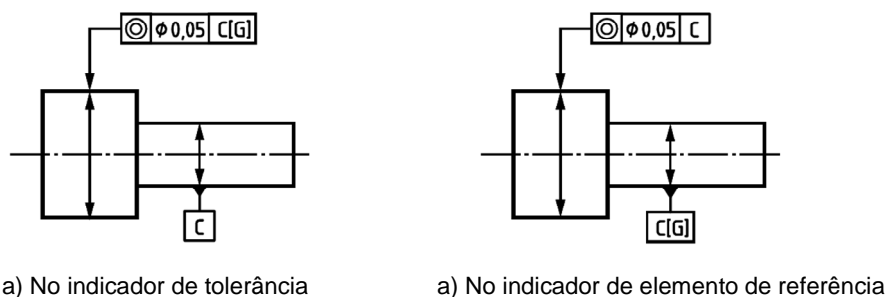


Figura 7.106 – Exemplos de indicações alternativas do componente de especificação do método de associação (dos mínimos quadrados) para uma referência especificada simples. Adaptada do ISO 1101:2012/DAM 1

No caso de uma referência especificada simples, este componente pode ser indicado, em alternativa, quer no “indicador de tolerância”, quer no “indicador de elemento de referência”. Neste exemplo, a referência especificada simples, estabelecida a partir do elemento de referência C, é o eixo do cilindro associado.

#### 7.8.4.4 Componentes de especificação de uma restrição (coluna 4 da figura 7.94)

Os componentes de especificação de restrições para referências especificadas são opcionais e estão sujeitos a regras estabelecidas na ISO 5459.

Se não forem necessários todos os elementos de situação, constituintes de uma **referência especificada simples**, para bloquear todos os possíveis graus de liberdade da zona de tolerância, em relação à característica geométrica, deve adicionar-se uma indicação complementar (**PL**, **SL** e/ou **PT**), entre parêntesis retos, após a letra que identifica o elemento de referência, no indicador de tolerância (ver exemplos nas figuras 7.107 e 7.108), exceto quando, a partir da especificação, for óbvio qual o elemento de situação a utilizar (ver exemplo na figura 7.109).



a) Só o plano



b) Só a linha reta



c) Só o ponto



d) Só o ponto e a linha reta

Figura 7.107 – Indicação de referências especificadas simples em que apenas são necessários alguns dos elementos do respetivo conjunto de elementos de situação. Adaptada da ISO 5459

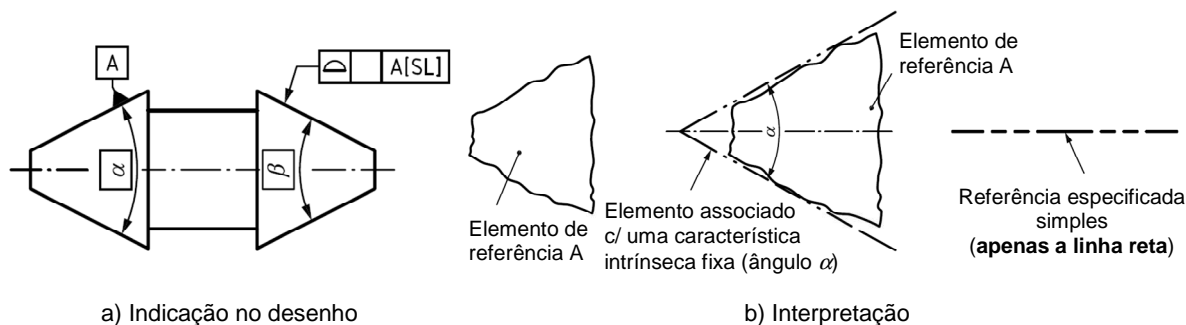


Figura 7.108 – Exemplo de uma especificação (tolerância do perfil de uma superfície) em que apenas é necessário um elemento de situação para estabelecer a referência especificada. Adaptada da ISO 5459

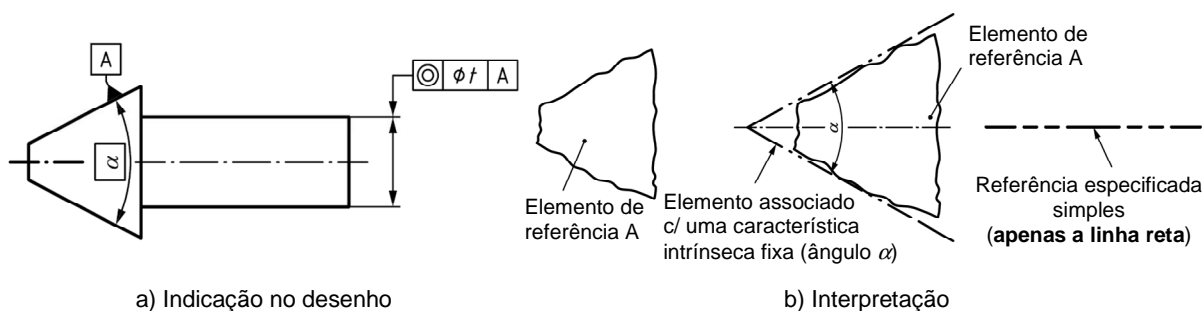
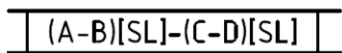
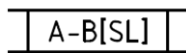


Figura 7.109 – Exemplo de uma especificação (tolerância de coaxialidade) em que é óbvio o elemento de situação necessário para estabelecer a referência especificada. Adaptada da ISO 5459

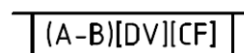
Quando se aplica uma indicação complementar (**CF**, **SL**, **PL** e/ou **PT**), inscrita entre parêntesis retos, a todos os elementos da coleção de superfícies de uma **referência especificada comum**, a sequência de letras que identifica essa referência especificada deve ser indicada entre parêntesis curvos [ver exemplos nas figuras 7.110 a), 7.110 c) e 7.99]. Se essa indicação complementar se aplicar apenas a um elemento da coleção de superfícies, a respetiva sequência de letras não deve ser indicada entre parêntesis curvos e a indicação complementar apenas se aplica ao elemento identificado pela letra imediatamente antes da(s) indicação(ões) [ver figura 7.110 b)].



a) Só as linhas retas



b) Só a linha reta



c) Distância variável e elemento de contacto

Figura 7.110 – Indicações complementares para referências especificadas comuns. Adaptada da ISO 5459

Se a distância linear entre os membros de uma coleção de elementos, que formam uma referência especificada comum, for considerada variável (“*variable distance*”), deve colocar-se o modificador **[DV]**, no indicador de tolerância, após as letras que identificam a referência especificada comum [ver exemplos nas figura 7.110 c) e 7.111].

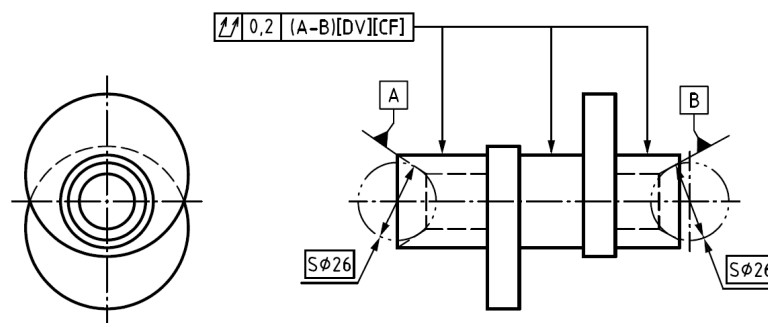


Figura 7.111 – Exemplo de uma referência especificada comum em que a distância linear entre os elementos da coleção é considerada variável e no qual a indicação de referências parciais é omissa. Adaptada da ISO 5459

Se o elemento associado, que estabelece a referência especificada, não for do mesmo tipo do elemento nominal, devem utilizar-se referências parciais (ver secção 7.8.5) e deve acrescentar-se a indicação **[CF]** (“*contact feature*”), no indicador de tolerância, após a(s) letra(s) identificadora(s) do(s) elemento(s) de referência [ver exemplos nas figura 7.110 c) e 7.111].

Se uma referência especificada for utilizada apenas para bloquear os graus de liberdade de orientação (ângulos) e não a posição da zona de tolerância, deve acrescentar-se a indicação complementar **><**, no indicador de tolerância, após a letra identificadora do elemento de referência (ver figura 7.87). O símbolo **><** deve ser omissa quando a característica geométrica apenas controla a orientação do elemento toleranciado (p. ex. através de uma especificação de paralelismo).

#### 7.8.4.5 Componente de especificação de elemento derivado (coluna 5 da figura 7.94)

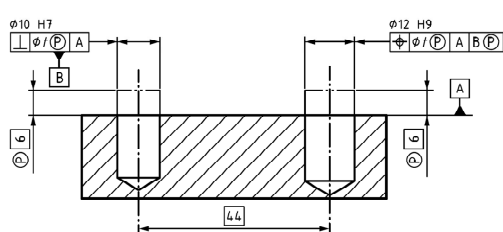
Por omissão, quando o elemento de referência, utilizado no estabelecimento de uma referência especificada, é um elemento de tamanho (“*feature of size*”), essa referência é constituída pelo **elemento derivado** correspondente ao respetivo elemento integral completo (ver exemplos na figura 7.20).

O componente de especificação de um **elemento de referência projetado**, assinalado através da inscrição do símbolo modificador **(P)**, no segundo ou no terceiro compartimento da secção de “referências especificadas” do indicador de tolerância, após a letra que designa uma referência especificada estabelecida a partir de um elemento de tamanho, é um componente opcional e está sujeito a regras estabelecidas na ISO 5459.

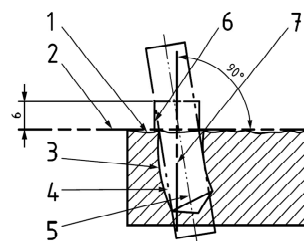
Numa referência especificada secundária ou terciária, determinada a partir de um elemento de tamanho, o símbolo modificador **(P)** é utilizado para indicar que, o elemento de referência deve ser estabelecido através do ajustamento de um elemento associado, com uma extensão igual ao comprimento projetado, ao elemento prolongado que, por sua vez, é um elemento associado construído a partir do elemento real (ver exemplo na figura 7.112 e a secção 7.7). O elemento associado ajustado ao elemento prolongado está sujeito a restrições de orientação impostas pelas

referências especificadas precedentes. A referência especificada daí resultante é o elemento derivado deste elemento associado.

Com a indicação do símbolo modificador  $\textcircled{P}$ , a(s) dimensão(ões) do elemento de referência projetado deve(m) ser indicada(s) diretamente no desenho [ver figura 7.112 a)] ou após o modificador  $\textcircled{P}$ , inscrito no indicador de tolerância. A(s) dimensão(ões) deste prolongamento deve(m) ser consideradas como teoricamente exata(s).



a) Indicação no desenho



b) Interpretação da especificação B $\textcircled{P}$

#### Legenda:

- 1 Elemento integral real da superfície plana.
- 2 Referência especificada A: um elemento integral associado a 1.
- 3 Elemento integral real da superfície cilíndrica.
- 4 Elemento integral associado a 3.
- 5 Elemento derivado de 4.
- 6 Elemento integral associado à porção de 4, com a **restrição** de ser perpendicular a 2.
- 7 Referência especificada B: o elemento derivado de 6 (**refer. especific. secundária**).

Figura 7.112 – Exemplo de aplicação do símbolo modificador  $\textcircled{P}$  numa referência especificada secundária.

Adaptada da ISO 5459

Na figura 7.112 b), pode observar-se o resultado da aplicação do modificador  $\textcircled{P}$  à referência especificada secundária B, num sistema de referências especificadas. Este modificador não tem qualquer efeito quando é aplicado a uma referência especificada primária. Na definição do elemento de referência projetado e na determinação da referência especificada utiliza-se o mesmo critério de associação.

#### 7.8.4.6 Componente de especificação da condição de matéria (coluna 6 da figura 7.94)

A aplicação dos componentes de especificação do requisito de matéria, indicados através dos símbolos modificadores  $\textcircled{M}$  e  $\textcircled{L}$ , em referências especificadas estabelecidas a partir de elementos de tamanho, é opcional e está sujeita às regras estabelecidas na ISO 2692 (ver figura 7.53 e o capítulo 8 deste texto).

#### 7.8.4.7 Indicações de componentes de especificação de referências especificadas no indicador do elemento de referência

Se o componente de especificação de um filtro, o componente de especificação do método de associação para o elemento de referência ou ambos, se aplicarem a todas as tolerâncias correlacionadas com uma dada referência especificada, os componentes de especificação relevantes podem ser indicados no indicador do elemento de referência, após a letra de referência. Estes

componentes devem ser indicados entre parêntesis retos, separados por um espaço se estiverem ambos presentes [ver exemplos nas figuras 98 b), 101 b) e 106 b)].

### 7.8.5 Referências parciais

Quando, devido às suas irregularidades intrínsecas, não for aconselhável utilizar um elemento integral completo para estabelecer um elemento de referência numa peça, é possível indicar, em alternativa, porções desse elemento simples (áreas, linhas ou pontos), em conjunto com as suas dimensões e posições expressas em termos de valores teoricamente exatos (TEDs). Estas porções são denominadas de **referências parciais** ("*datum targets*") e permitem simular a interface entre o elemento simples considerado na peça e um ou mais elementos ideais de contacto.

A utilização de elementos integrais completos e irregulares, no desempenho de funções de elementos de referência, pode introduzir variações ou falta de repetibilidade nas operações de verificação das respetivas peças reais. De entre estes elementos, podem referir-se, a título de exemplo, superfícies não planas ou irregulares produzidas por fundição, forjamento ou moldação, superfícies de construções soldadas e superfícies de perfis delgados sujeitos a encurvadura, empenamento ou a outras distorções (ASME Y14.5).

As referências parciais representam as zonas de apoio da peça, utilizadas durante as operações de fabricação e de verificação, com vista a permitir definir as referências requeridas para satisfazer os requisitos funcionais (ver figura 7.114) [H1]. Contudo, antes de se proceder à especificação de referências parciais, é necessário constatar se o funcionamento da peça poderá vir a ser afetado pelo facto da especificação da referência ser efetuada apenas através de referências parciais, em vez de se recorrer à superfície completa.

O tipo de referência parcial (**ponto**, **linha** ou **área**) é identificado através de um símbolo apropriado (ver quadro 7.4) e cada referência parcial é assinalada através de um **indicador de referência parcial** ("*datum target indicator*") constituído por um quadro ligado ao símbolo, através de uma linha de indicação (ver exemplos nas figuras 7.114 a 7.116). O **quadro de referência parcial** ("*datum target frame*") é um quadro circular dividido em dois compartimentos; o superior com eventual informação adicional, p. ex. sobre as dimensões de uma referência parcial do tipo área, e o inferior reservado ao identificador (letra) do elemento de referência seguido de um algarismo (de 1 a *n*), correspondente ao número da referência parcial (ver quadro 7.4 e os exemplos das figuras 7.114 a 7.116). Os quadros de referência parcial podem assinalar **referências parciais simples ou móveis**. O **modificador móvel** ("*moveable modifier*") da referência parcial é utilizado para definir a direção segundo a qual a posição dessa referência (simulada por um elemento físico ou componente), em relação às outras referências parciais, não é fixa (ver quadro 7.4 e o exemplo da figura 7.116).

Se um elemento de referência simples for estabelecido a partir de uma ou mais referências parciais, pertencentes apenas a uma superfície, o seu identificador (letra) de elemento de referência deve ser

repetido junto do respetivo indicador, seguido da lista de números (separados por vírgulas) que identificam as referências parciais (ver exemplos nas figuras 7.114 a 7.116).

No caso de haver apenas uma referência parcial, a sua indicação no desenho poderá ser simplificada, através da colocação do indicador de elemento de referência na correspondente porção de superfície do elemento integral, em conformidade com as regras indicadas da secção 7.3.5 deste texto [ver exemplos nas figuras 7.113 a) e b)].

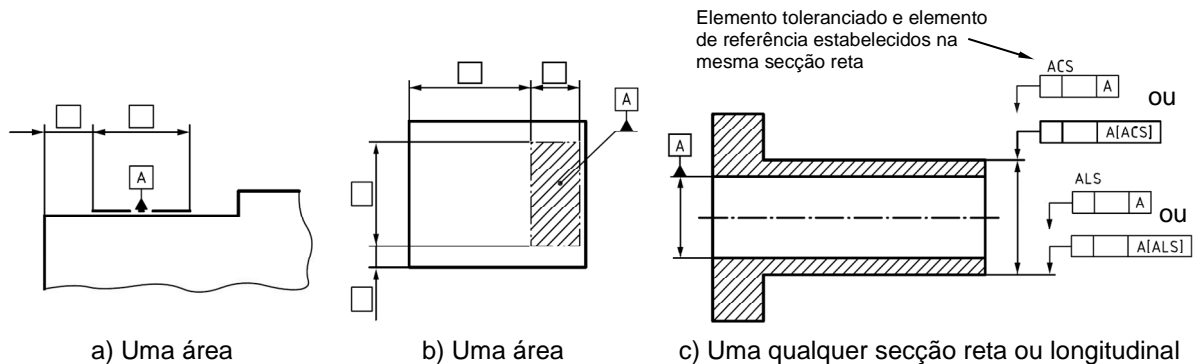
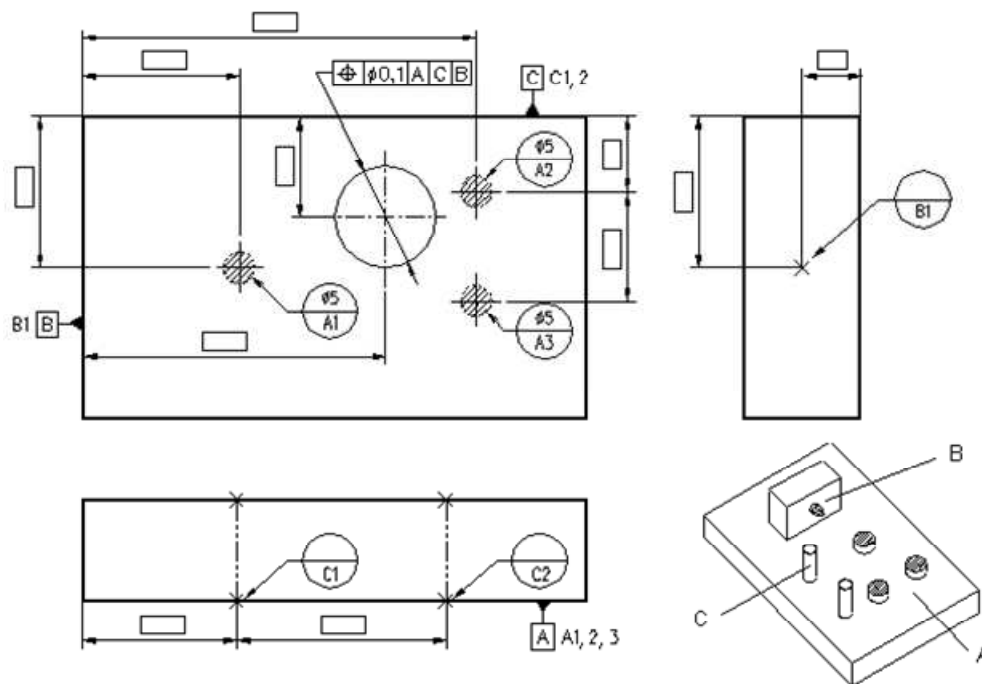


Figura 7.113 – Exemplos de simplificações de indicações nos desenhos quando há apenas uma única referência parcial. Adaptada da ISO 5459

Por sua vez, se o elemento de referência puder ser definido numa qualquer secção reta ou numa qualquer secção longitudinal do elemento integral, em simultâneo com o elemento toleranciado, tal deve ser indicado através da inscrição dos símbolos modificadores, respetivamente, ACS ou ALS, na zona adjacente superior do indicador de tolerância ou após a letra identificadora da referência especificada, inscrita no referido indicador [ver exemplos na figura 7.113 c)].

Num sistema de referências especificadas constituído por três planos e definido através de referências parciais, a referência especificada primária deverá ser estabelecida por três referências parciais (pontos ou áreas) não colineares, a referência secundária deverá ser definida por duas referências parciais (pontos, linhas ou áreas) e a referência terciária deverá ser definida por uma referência parcial (ponto, linha ou área) (ver exemplo na figura 7.114) [J1]. As referências parciais do tipo área são necessárias sempre que a utilização de pinos boleados ou pontiagudos, na simulação de pontos, for considerada inadequada (ASME Y14.5).

Se um elemento de referência simples for estabelecido a partir de uma ou mais referências parciais, pertencentes apenas a uma superfície, o seu identificador (letra) de elemento de referência deve ser repetido junto do respetivo indicador, seguido da lista de números (separados por vírgulas) que identificam as referências parciais (ver exemplos nas figuras 7.114 a 7.116).



Materialização das referências parciais:

- 3 áreas circulares planas;
- 2 linhas retas, geratrizes de pinos cilíndricos;
- 1 superfície boleada.

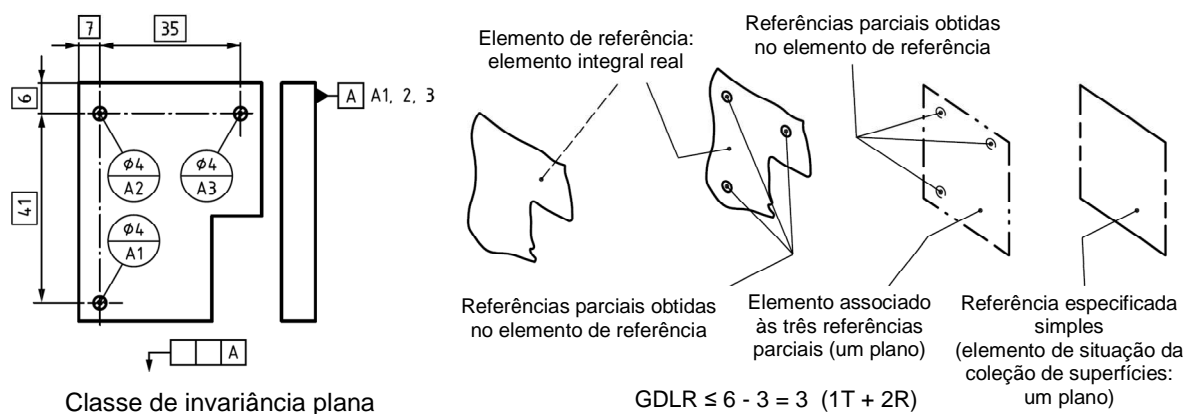
- A – 3 áreas circulares;
- B – 1 ponto;
- C – 2 linhas retas.

a) Indicação no desenho

b) Esquema de fixação

Figura 7.114 – Exemplo de um sistema de referências especificadas constituído por três planos estabelecidos através de referências parciais. Adaptado de [J1]

Na figura 7.115 a), pode observar-se a indicação de uma referência especificada simples estabelecida a partir de um plano definido por meio de três referências parciais (áreas circulares Ø4) não colineares, obtidas após partição/extração, cujas posições estão definidas através de dimensões teoricamente exatas.



a) Indicação no desenho

b) Interpretação

Figura 7.115 – Exemplo de uma referência especificada plana estabelecida a partir de três referências parciais (áreas). Adaptada da ISO 5459



Esta referência especificada simples é caracterizada pelo elemento de situação do plano associado ao elemento integral real, constituído pelas três áreas circulares  $\varnothing 4$  mm, sem restrições externas. A classe de invariância da superfície nominal é plana e o elemento de situação é um plano, que permite restringir até um máximo de 3 graus de liberdade da zona de tolerância do elemento especificado [figura 7.115 b)].

No exemplo apresentado na figura 7.116, pode observar-se a indicação de uma tolerância geométrica de localização, numa configuração de quatro furos  $\varnothing 6,3$  mm, relativamente um sistema de referências especificadas estabelecidas a partir de referências parciais simples e móveis. A referência primária é definida a partir de três pontos não colineares, posicionados entre si através de distâncias teoricamente exatas e distribuídos por duas superfícies paralelas desfasadas, a uma distância teoricamente exata de 20 mm, que estabelecem um ressalto ("stepped surfaces") e constituem uma referência especificada comum. Logo, a referência especificada primária é caracterizada pelo elemento de situação da coleção de superfícies: um plano [ver também um exemplo na figura 7.118 f)].

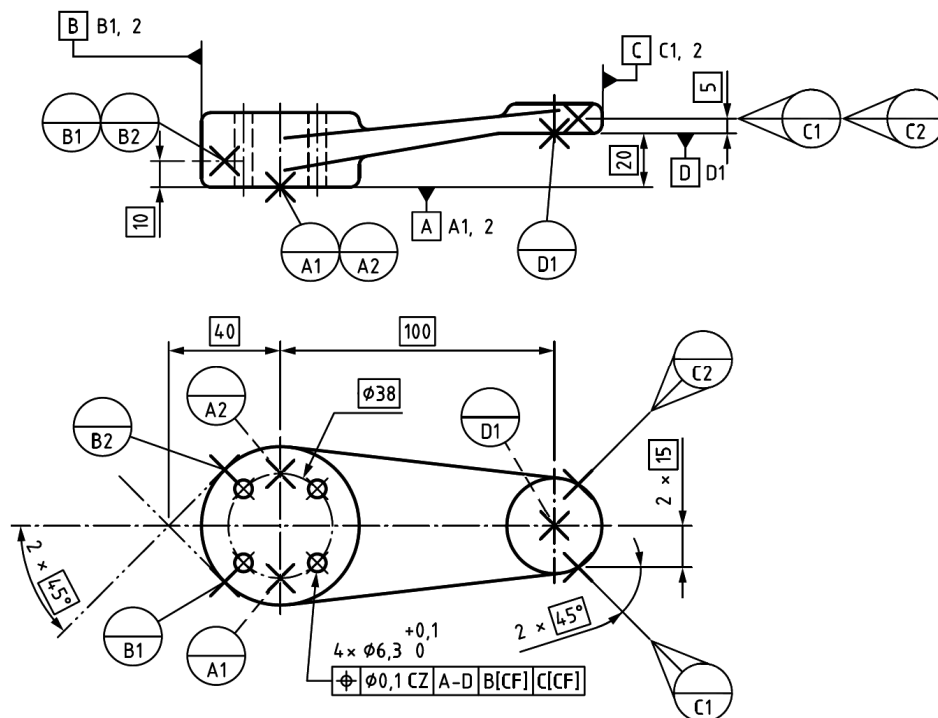


Figura 7.116 – Exemplo de um sistema de referências especificadas estabelecidas a partir de referências parciais simples e móveis. Adaptada da ISO 5459

A referência secundária é estabelecida a partir de duas linhas retas (visíveis na vista frontal), definidas pela interface entre o cilindro B e um elemento de contacto de tipo diferente, indicado pela inscrição do modificador [CF], após o identificador do elemento de referência, no indicador da tolerância de localização, e posicionadas a uma distância teoricamente exata de 10 mm, em relação às referências parciais A1 e A2. A distância entre as referências parciais B1 e B2 é variável, dependendo do diâmetro real do cilindro e do elemento de contacto (elemento com uma configuração

em  $vê$  de ângulo  $90^\circ$ ). O elemento associado utilizado no estabelecimento da referência especificada é o elemento em  $vê$  e não o cilindro. A referência especificada secundária é caracterizada pela linha reta, que passa pelo vértice do elemento em  $vê$  e está sujeita a uma restrição de orientação (perpendicularidade) em relação à referência especificada primária, embora o respetivo plano bissetor mantenha ainda um grau de liberdade de rotação lateral.

Finalmente, a referência terciária é estabelecida a partir de dois pontos C1 e C2 definidos pela interface entre o cilindro C e um elemento de contacto de tipo diferente, indicado pela inscrição do modificador [CF], após o identificador do elemento de referência, no indicador da tolerância de localização, à distância fixa de 30 mm entre si e posicionados a uma distância teoricamente exata de 5 mm, em relação à referência parcial D1. Como a distância entre os dois pares de referências parciais B1 e B2 e C1 e C2 é desconhecida, C1 e C2 são definidos como referências parciais móveis, que se movimentam sincronizadamente, em relação às referências parciais B1 e B2. A referência especificada terciária é caracterizada pelo ponto mediano construído a partir das referências parciais C1 e C2. Este ponto mediano é coincidente com o plano bissetor do elemento em  $vê$ , eliminando o grau de liberdade de rotação que restava.

O sistema de referências especificadas resultante é pois constituído por um conjunto de dois planos perpendiculares e por uma linha reta.

### **7.8.6 Alguns exemplos de referências e sistemas de referências especificadas**

Nas figuras seguintes, faz-se um resumo dos principais exemplos de referências e sistemas de referências especificadas apresentados na norma ISO 5459:2011. Para cada um deles, assinalam-se as operações com elementos geométricos necessárias para a obtenção do(s) elemento(s) de situação dos elemento(s) associado(s) ao(s) elemento(s) integral(ais) real(ais) escolhidos como elementos de referência. Indicam-se o(s) elemento(s) de situação a partir do(s) qual(ais) pode ser definida a orientação e/ou a posição de zonas de tolerância ou de um elemento ideal que representa, por exemplo, uma condição virtual (ver capítulo 8), bem como o número máximo de graus de liberdade (GDLR) que podem ser eliminados (restringidos) pelas referências especificadas assim estabelecidas, agrupando esses graus de liberdade em translações (T) e rotações (R).

No caso de referências e sistemas de referências especificadas estabelecidas com base em coleções de dois elementos integrais, menciona-se também o número de características de situação (NCS) necessárias para a definição da parametrização da situação relativa entre esses elementos. Os parâmetros nominalmente nulos (implícitos) são considerados nas propriedades da geometria dos elementos, sendo introduzidos como restrições geométricas.


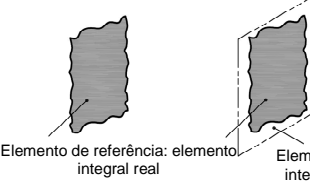
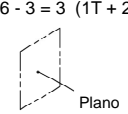
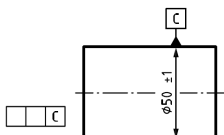
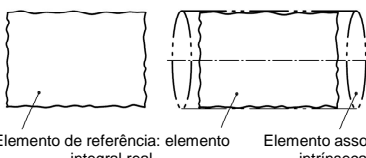

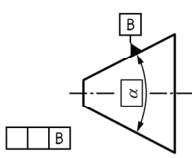
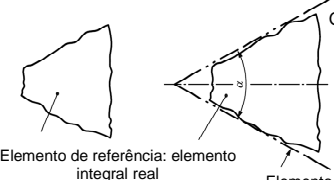
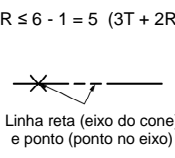
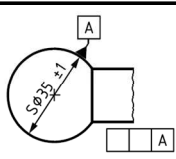
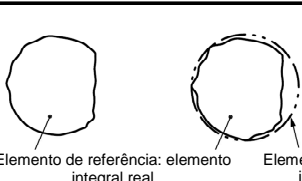
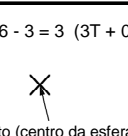
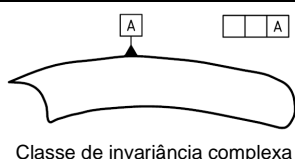
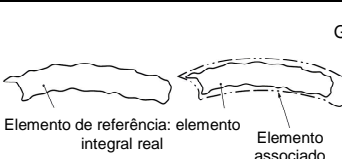
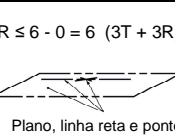
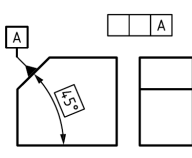
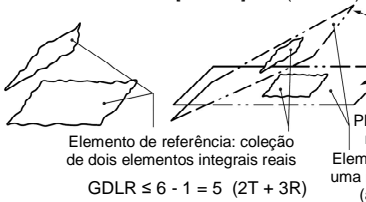
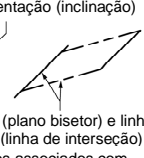
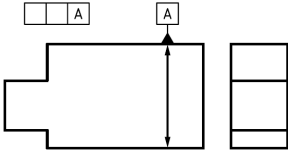
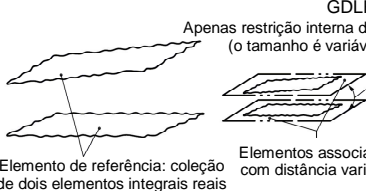
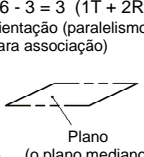
Indicação no desenho	Interpretação		
a) Plano	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância plana</p>	 <p>Elemento de referência: elemento integral real</p>	 <p>Plano</p>	$GDLR \leq 6 - 3 = 3 \quad (1T + 2R)$
b) Cilindro	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância cilíndrica</p>	 <p>Elemento de referência: elemento integral real</p>	 <p>Linha reta (eixo do cilindro)</p>	$GDLR \leq 6 - 2 = 4 \quad (2T + 2R)$
c) Cone	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância de revolução</p>	 <p>Elemento de referência: elemento integral real</p>	 <p>Linha reta (eixo do cone) e ponto (ponto no eixo)</p>	$GDLR \leq 6 - 1 = 5 \quad (3T + 2R)$
d) Esfera	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância de esférica</p>	 <p>Elemento de referência: elemento integral real</p>	 <p>Ponto (centro da esfera)</p>	$GDLR \leq 6 - 3 = 3 \quad (3T + 0R)$
e) Superfície complexa	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância complexa</p>	 <p>Elemento de referência: elemento integral real</p>	 <p>Plano, linha reta e ponto</p>	$GDLR \leq 6 - 0 = 6 \quad (3T + 3R)$
f) Dois planos concorrentes	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância prismática</p>	 <p>Elemento de referência: coleção de dois elementos integrais reais</p>	 <p>Plano (plano bisetor) e linha reta (linha de interseção)</p>	$NCS = 6 - [3 + 3 - 1] = 5 \quad (0T + 1R)$ $GDLR \leq 6 - 1 = 5 \quad (2T + 3R)$
g) Dois planos paralelos opostos	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância plana</p>	 <p>Elemento de referência: coleção de dois elementos integrais reais</p>	 <p>Plano (o plano mediano)</p>	$GDLR \leq 6 - 3 = 3 \quad (1T + 2R)$

Figura 7.117 – Exemplos de referências especificadas simples (ISO 5459)

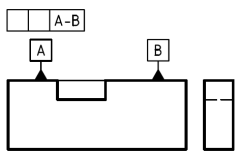
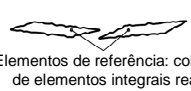

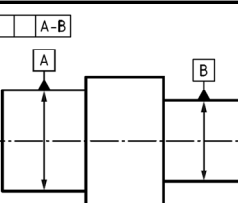
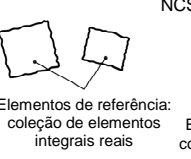
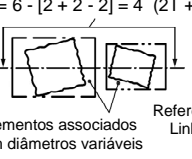
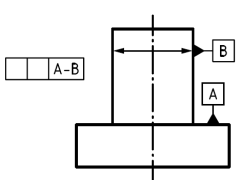

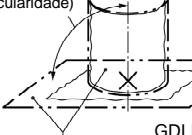
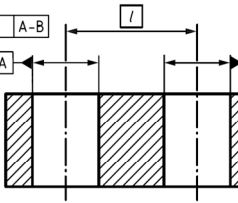
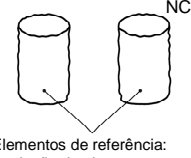
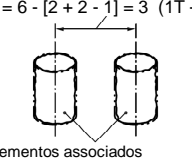
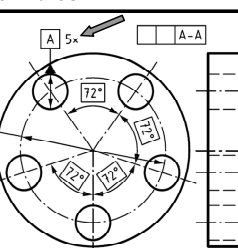
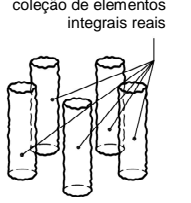
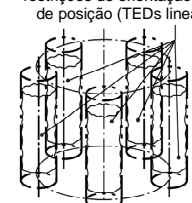
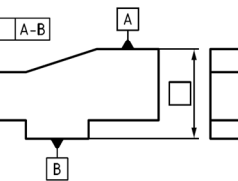
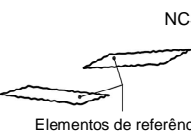
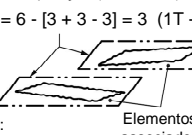
Indicação no desenho	Interpretação		
a) Dois planos complanares	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância plana</p>	 <p>Elementos de referência: coleção de elementos integrais reais</p>	 <p>Elementos associados</p>	<p>Restrições de orientação e posição (complanaridade) entre elementos associados</p> $NCS = 6 - [3 + 3 - 3] = 3 \quad (1T + 2R)$ <p><math>GDLR \leq 6 - 3 = 3 \quad (1T + 2R)</math></p> <p>Referência especificada comum: Plano</p>
b) Dois cilindros coaxiais	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância cilíndrica</p>	 <p>Elementos de referência: coleção de elementos integrais reais</p>	 <p>Elementos associados com diâmetros variáveis</p>	<p>Restrições de orientação (paralelismo) e de posição (coaxialidade)</p> $NCS = 6 - [2 + 2 - 2] = 4 \quad (2T + 2R)$ <p>Referência especificada comum: Linha reta (eixo do cilindro)</p> <p><math>GDLR \leq 6 - 2 = 4 \quad (1T + 2R)</math></p>
c) Plano e cilindro perpendiculares entre si	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância de revolução</p>	 <p>Elementos de referência: coleção de elementos integrais reais</p>	 <p>Elementos associados (um cilindro com diâmetro variável e um plano)</p>	<p>Restrição de orientação (perpendicularidade)</p> $NCS = 6 - [3 + 2 - 1] = 2 \quad (0T + 2R)$ <p>Referência especificada comum: (linha reta e um ponto)</p> <p><math>GDLR \leq 6 - 1 = 5 \quad (3T + 2R)</math></p>
d) Dois cilindros paralelos	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância prismática</p>	 <p>Elementos de referência: coleção de elementos integrais reais</p>	 <p>Elementos associados com diâmetros variáveis</p>	<p>Restrições de orientação (paralelismo) e de posição (distância L)</p> $NCS = 6 - [2 + 2 - 1] = 3 \quad (1T + 2R)$ <p>Referência especificada comum: Plano e linha reta</p> <p><math>GDLR \leq 6 - 1 = 5 \quad (2T + 3R)</math></p>
e) Configuração de cinco cilindros	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância prismática</p>	 <p>Elementos de referência: coleção de elementos integrais reais</p>	 <p>Elementos associados c/ diâm. variáveis e restrições de orientação (paralelismo) de posição (TEDs linear e angulares)</p>	<p>Referência especificada comum: (plano e linha reta)</p> <p><math>GDLR \leq 6 - 1 = 5 \quad (2T + 3R)</math></p>
f) Dois planos paralelos	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
 <p>Classe de invariância plana</p>	 <p>Elementos de referência: coleção de elementos integrais reais</p>	 <p>Elementos associados</p>	<p>Restrições de orientação (paralelismo) de posição (TED linear)</p> $NCS = 6 - [3 + 3 - 3] = 3 \quad (1T + 2R)$ <p>Referência especificada comum: Plano</p> <p><math>GDLR \leq 6 - 3 = 3 \quad (1T + 2R)</math></p>

Figura 7.118 – Exemplos de referências especificadas comuns (ISO 5459)

Indicação no desenho	Interpretação		
a) Dois planos complanares	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
<p>Classe de invariância complexa</p> $\text{GDLR} \leq 6 - 0 = 6 \quad (3T + 3R)$	<p>Plano associado ao elemento de referência A (referência especificada primária)</p> <p>Elementos de referência: elementos integrais reais</p> <p>Referência especificada secundária</p> <p>Restrições de orientação (perpendicularidade)</p> <p>a)</p>	<p>Plano associado ao elemento de referência B (referência especificada secundária)</p> <p>Referência especificada primária</p> <p>Restrição de orientação (perpendicularidade)</p> <p>b)</p>	<p>Sistema de referências especificadas (plano, linha reta e ponto)</p> <p>Equivalente a 3 planos</p> <p>c)</p> <p>d)</p>
b) Dois cilindros coaxiais	Partição/extração	Associação	Referência especificada (elementos de situação)
<p>Classe de invariância de revolução</p> $\text{GDLR} \leq 6 - 1 = 5 \quad (3T + 2R)$	<p>Cilindro associado ao elemento de referência</p> <p>Elementos de referência: coleção de elementos integrais reais</p> <p>NCS = <math>6 - [2 + 3 - 1] = 2 \quad (0T + 2R)</math></p> <p>Restrição de orientação (perpendicularidade)</p>	<p>Sistema de referências especificadas: linha reta (referência primária) e ponto (intersecção entre as referências primárias e secundárias)</p> <p>Referência especificada primária (eixo do cilindro associado)</p> <p>Restrição de orientação (perpendicularidade)</p>	<p>Plano associado (referência secundária) com restrição de orientação em relação à referência primária</p>

Figura 7.119 – Exemplos de sistemas de referências especificadas (ISO 5459)

## 7.9 Conceitos de base sobre operadores de especificação de características geométricas de forma

### 7.9.1 Introdução

A definição de termos e conceitos e a indicação dos operadores de especificação completos, para características geométricas de forma (retitude, planeza, circularidade e cilindridade) de elementos integrais, são o objeto das normas ISO 12780, ISO 12781, ISO 12181 e ISO 12180.

Um **operador de especificação completo** (ver ISO 17450-2) é um conjunto ordenado e completo de operações de especificação inequívocas, numa ordem bem definida. Neste âmbito, este operador define a banda de transmissão, para os perfis de retitude ou de circularidade e para as superfícies de planeza ou de cilindridade, conjuntamente com uma geometria apropriada para a extremidade do apalpador.

As noções sobre filtragem geométrica são úteis, não só em termos da verificação geométrica de produtos mas também para todo o domínio GPS, uma vez que o projetista, encarregado da especificação geométrica de um produto, tem de conceber um modelo de superfícies não ideais (*“skin model”*) que seja uma representação da interface física da peça. O conhecimento destas noções permite que, através da leitura da especificação técnica de um produto, se fique com uma visão unificada sobre aquilo que o projetista tinha em mente ao especificar as diferentes tolerâncias e que o metrologista deve fazer durante a verificação da peça real [S4].

Os documentos GPS ISO, atrás citados, foram os primeiros que, não sendo considerados estritamente como normas de medição, abordaram o efeito da filtragem num contexto de toleranciamento geométrico que está dentro do âmbito da ISO 1101. À data da sua publicação, não houve consenso sobre o estabelecimento de especificações, por omissão, relativas à **operação de filtragem** e ao **método de associação** [para o ajuste do elemento de referência (*“reference feature”*)]. Logo, na especificação de qualquer característica geométrica de forma, dever-se-ão indicar explicitamente os componentes relativos a estas operações, de modo que a especificação possa ser única.

Um dos objetivos da atual revisão da norma ISO 1101 centra-se no estabelecimento dos meios necessários para uma indicação inequívoca da informação sobre filtragem e associação, nos requisitos geométricos, permitindo aos utilizadores tirar proveito das ferramentas definidas nas normas sobre as características geométricas de forma, atrás referidas (ver secções 7.4.1.2.2 e 7.4.1.2.3, deste texto). Enquanto não há consenso, ao nível da ISO, sobre especificações por omissão, para estas operações, a nova norma ISO 1101 vai estabelecer também os meios para a indicação de especificações gerais, por omissão, específicas do desenho, para a filtragem e a associação (ver secção 7.4.4).

## 7.9.2 Extração

### 7.9.2.1 Generalidades

A **extração** (*“extraction”*) é uma operação de especificação que permite obter uma superfície primária extraída (conjunto finito de pontos de dados obtidos por amostragem na superfície primária) como representação aproximada do modelo de superfície não ideal (*“skin model”*) de uma peça (ISO 14406).

A amostragem, por si só, é insuficiente para assegurar a extração de elementos, devendo ser acompanhada por alguma suavização que permita remover ruído e detalhes não pretendidos, presentes nos dados de medição [S4]. Logo, a extração de dados envolve sempre a aplicação de um certo processo de filtragem, nomeadamente o proporcionado pela ponta esférica do apalpador (filtragem mecânica) [H1].

### 7.9.2.2 Breves noções sobre o conteúdo harmónico de elementos geométricos nominais

Um sinal de comprimento finito pode ser decomposto num número de componentes sinusoidais que constituem uma **série de Fourier**. Esta série é composta por uma sinusóide fundamental, cujo comprimento de onda é o próprio comprimento do sinal, e por sinusóides harmónicas, cujos comprimentos de onda são submúltiplos inteiros do comprimento de onda fundamental. A sinusóide fundamental é designada de primeiro harmónico do sinal. A sinusóide cujo comprimento de onda é metade do comprimento de onda fundamental denomina-se segundo harmónico. A sinusóide cujo comprimento de onda é um terço do comprimento de onda fundamental designa-se de terceiro harmónico, etc. (ver figura 7.120). Deste modo, o  $n$ -ésimo harmónico é a sinusóide cujo comprimento de onda é o submúltiplo inteiro  $1/n$  do comprimento de onda fundamental.

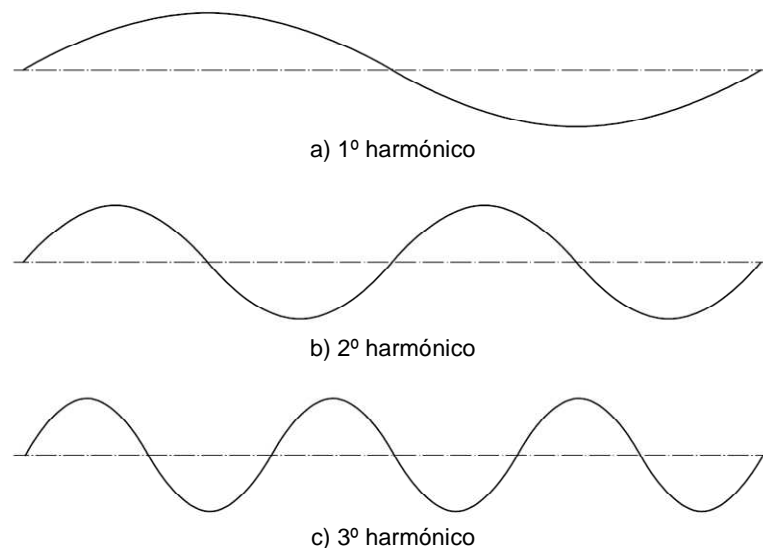


Figura 7.120 – Exemplo dos três primeiros harmónicos de um sinal (ISO 12780-2)

Num **elemento nominalmente reto**, um perfil de retitude pode ser decomposto nos seus harmónicos, pela maneira atrás descrita (ISO 12780-2).

Num **elemento nominalmente plano**, a sua superfície é uma área, enquanto todos os sinais atrás decompostos em série de Fourier são perfis (ver figura 7.120). Uma área pode ser pensada como uma combinação de dois perfis, em que as direções destes podem ser utilizadas para estabelecer um sistema de coordenadas para a área. No caso de um plano, os dois perfis são ortogonais entre si, podendo uma localização qualquer, nesse plano, ser referenciada através das suas coordenadas, em termos de distâncias em relação a uma origem, segundo as direções dos perfis (ISO 12781-2).

Uma área pode, pois, ser decomposta numa combinação de duas séries de Fourier. Na prática, esta área terá um comprimento finito, em cada uma das duas direções definidas pelos perfis ortogonais. Cada componente individual desta decomposição tem dois números de harmónicos; o primeiro corresponde ao número do harmónico na direção do primeiro perfil e o segundo número corresponde

ao número do harmónico na direção do segundo perfil. O componente individual é uma combinação destes dois componentes harmónicos especificados.

Assim, por exemplo, o harmónico (6.4) é uma combinação do sexto harmónico do primeiro perfil (isto é, 6 ondas ao longo do seu comprimento) e do quarto harmónico do outro perfil (isto é, 4 ondas ao longo do outro comprimento). Aquando da especificação de uma estratégia de amostragem apropriada para a avaliação, é importante ter em consideração quais as combinações de harmónicos que estão presentes num elemento de planeza.

Por sua vez, num **elemento nominalmente circular**, um perfil de circularidade é ligeiramente diferente, uma vez que o início e o fim do sinal se unem, dando origem a um perfil fechado. Este perfil retém desvios na direção radial mas é independente do diâmetro real da respetiva secção circular do elemento, pelo que os seus componentes sinusoidais são expressos em ondulações por rotação (UPR – “*undulations per revolution*”), em vez de comprimentos de onda. Neste caso, o comprimento de onda fundamental da série de Fourier é a circunferência da secção circular, ou uma ondulação por rotação, derivada de uma ação equivalente à excentricidade. Os outros harmónicos correspondem às ondulações por rotação mais elevadas (por exemplo, o segundo harmónico é o 2 UPR e representa o efeito da ovalização, o terceiro harmónico é o 3 UPR e poderá ser causado pela distorção da peça provocada pelas forças de aperto ou de fabrico, etc.), ver a ISO 12181-2 e a referência [L2].

Finalmente, num **elemento nominalmente cilíndrico**, um perfil de geratriz e um perfil de circularidade podem ser decompostos nos seus componentes harmónicos, conforme já foi atrás descrito (ISO 12180-2).

A superfície de um cilindro é uma área que pode também ser pensada como uma combinação de dois perfis, neste caso os perfis de geratriz e de circularidade, podendo uma localização qualquer no cilindro ser referenciada através da indicação das suas coordenadas, em termos da distância em torno da circunferência e da distância sobre a geratriz, em relação a uma origem.

Num cilindro, se o sistema de coordenadas for definido pelos perfis de circularidade e de geratriz, então o harmónico (6.4) é uma combinação do sexto harmónico do perfil de circularidade (isto é, 6 UPR) e do quarto harmónico do perfil de geratriz (isto é, 4 ondas ao longo da geratriz). Aquando da especificação de uma estratégia de amostragem apropriada para a avaliação, é importante ter em consideração quais as combinações de harmónicos que estão presentes num elemento de cilindridade.

As séries de Fourier truncadas são exemplos de **modelos matemáticos primários**, cada um deles definido como sendo um conjunto de representações matemáticas imbricadas (“*nested*”) da porção de superfície, em que cada representação no conjunto pode ser descrita através de um número finito de parâmetros (ISO 16610-1).



Uma **porção de superfície** (porção de um elemento integral de partição) obtida quando está representada sob a forma de um modelo matemático primário especificado, com a indicação de um índice de imbricação ("*nesting index*"), é uma **superfície primária**.

Um conjunto finito de pontos de dados, obtidos por amostragem na superfície primária, dá origem à **superfície primária extraída**. Esta superfície representa a base para o processamento digital através de filtros de superfície e para o cálculo de parâmetros de caracterização. Neste âmbito, o termo "extraído" é reservado apenas aos objetos que contêm um número finito de pontos de dados. Logo, a superfície primária ainda é uma superfície contínua (ISO 14406).

### 7.9.2.3 O espelhamento espectral ("*aliasing*") e o critério de Nyquist

O registo da informação digital de um sinal envolve a amostragem desse sinal. A separação dos pontos de amostragem (o **intervalo de amostragem**) deve ser escolhida de modo que o sinal digitalizado seja representativo do sinal original, em termos do método através do qual esse sinal vai ser analisado.

Se o sinal original for de largura de banda limitada, na medida em que inclui um determinado comprimento de onda mais curto (harmónico mais elevado), então o **teorema de Nyquist** (teorema da amostragem) impõe uma limitação no intervalo de amostragem máximo possível (ISO 12780-2) que pode ser enunciada do modo seguinte:

- Sabendo que um sinal infinitamente longo não contém quaisquer comprimentos de onda mais curtos do que um dado comprimento de onda especificado, então esse sinal pode ser reconstruído a partir dos valores do sinal, espaçados em intervalos regulares, desde que o intervalo seja menor do que a metade do referido comprimento de onda.

Em rigor, o teorema de Nyquist aplica-se apenas a sinais infinitamente longos. No entanto, na prática, o critério de Nyquist, de "amostragem com um espaçamento inferior a metade do comprimento de onda mais curto presente", ainda é útil, apesar dos sinais serem de comprimento finito.

No caso de ser especificado um intervalo de amostragem maior do que o resultante da aplicação do critério de Nyquist, o sinal digitalizado vai sofrer de distorção por "espelhamento espectral" ("*aliasing distortion*"). O "espelhamento espectral" ("*aliasing*") dá-se quando uma sinusóide de comprimento de onda curta aparece como uma sinusóide de comprimento de onda maior, devido ao intervalo de amostragem escolhido ser demasiado grande para definir a verdadeira configuração do sinal (ver figura 7.121). Assim, se for escolhido um intervalo de amostragem demasiado grande, os harmónicos maiores parecerão ser harmónicos mais baixos e vão distorcer qualquer análise subsequente.

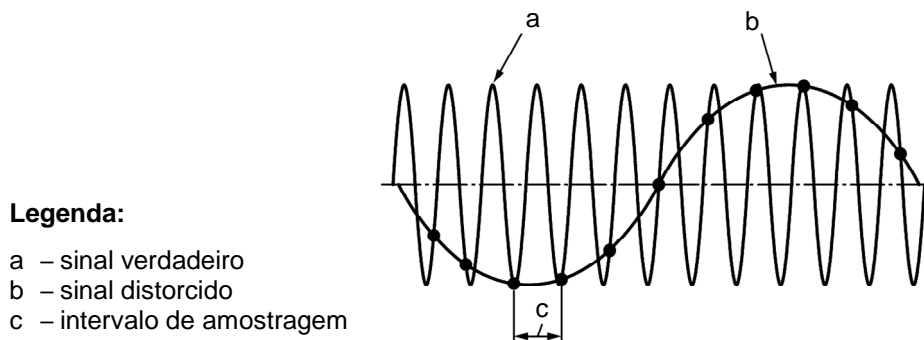


Figura 7.121 – Exemplo de “espelhamento espectral” (“*aliasing*”) derivado de um intervalo de amostragem demasiado grande para permitir uma definição da verdadeira configuração do sinal (ISO 12780-2)

Em termos de **avaliação de uma planeza**, atendendo a que a superfície de um plano é uma área, torna-se necessário especificar os intervalos de amostragem, ao longo das duas direções ortogonais definidas. O critério de Nyquist pode ser utilizado para estabelecer os intervalos de amostragem nas duas direções, através da consideração do harmónico mais elevado (sinusóide com o comprimento de onda mais curto) presente em cada direção (ISO 12781-2).

No caso de **avaliação de uma cilindridade**, uma vez que a superfície de um cilindro é igualmente uma área, é também preciso especificar os intervalos de amostragem, tanto ao longo da geratriz como em torno da circunferência. Mais uma vez, o critério de Nyquist pode ser usado para especificar os intervalos de amostragem nas duas direções, através da consideração do harmónico mais elevado, presente em cada uma delas (ISO 12180-2).

Na prática, muitos instrumentos de medição impõem uma limitação de banda artificial, no sinal, para ultrapassar o problema do “espelhamento espectral” (“*aliasing*”). Existem muitas maneiras de obter esta limitação de banda artificial. Aproximações correntes utilizam a limitação de banda “natural” da sonda (apalpador), filtros analógicos e digitais ou uma qualquer combinação destes, recorrendo-se geralmente a uma combinação de todos eles. Desde que o sinal tenha uma limitação de banda, o critério de Nyquist pode ser utilizado para impor um intervalo de amostragem máximo teórico [H1], de acordo com a seguinte indicação:

- Assumindo que podem ser ignorados todos os comprimentos de onda inferiores ao ponto 0,02 % da curva de transmissão do filtro gaussiano, então, por aplicação do teorema de Nyquist, são necessários, pelo menos, 7 pontos de amostragem por comprimento de onda de corte (“*cut-off*”), o que representa o número mínimo teórico de pontos de amostragem por “*cut-off*” (ISO 12180-2).

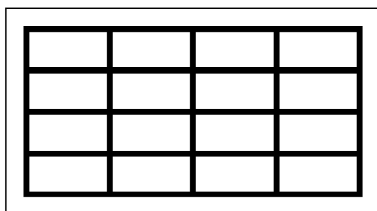
De acordo com Henzold [H1], com as atuais técnicas, este procedimento levaria a verificações muito demoradas e dispendiosas. Logo, por questões económicas, o número de pontos amostrados é normalmente inferior, mas estes deverão ser distribuídos de um modo otimizado. O número de pontos necessário e a sua distribuição dependem da configuração do desvio de forma (resultante do tipo de

processo de fabricação), da sua magnitude, da razão entre o desvio de forma e a tolerância geométrica e da característica geométrica a avaliar.

#### 7.9.2.4 Estratégias de extração e sua capacidade para avaliar o conteúdo harmónico

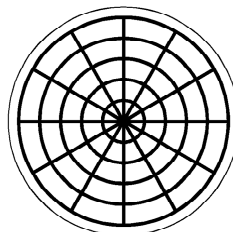
Para se conseguir uma avaliação fiável dos desvios geométricos de forma, é necessário adoptar uma estratégia de extração apropriada para a obtenção de um conjunto representativo de pontos na peça. Na determinação desta estratégia de extração, para os elementos de planeza ou de cilindridade, o papel do conteúdo harmónico da peça é fundamental. É este conteúdo harmónico que vai permitir a determinação da **densidade de pontos mínima teórica** necessária para efetuar a cobertura completa da peça.

No entanto, de acordo com as normas ISO 12781-2 e ISO 12180-2, na prática, não faz qualquer sentido efetuar uma cobertura exaustiva dos elementos de planeza ou de cilindridade, baseada na densidade de pontos mínima teórica, num intervalo de tempo aceitável e utilizando tecnologia corrente. Logo, nessas situações, dever-se-ão utilizar **estratégias de extração** mais limitadas que forneçam uma informação mais específica do que geral, no que diz respeito aos desvios de planeza ou de cilindridade. Nas figuras 7.122 e 7.123, apresentam-se as estratégias de extração propostas para estes fins, nos documentos normativos atrás referidos, com a inclusão de breves referências às suas capacidades para avaliar os possíveis conteúdos harmónicos a considerar.



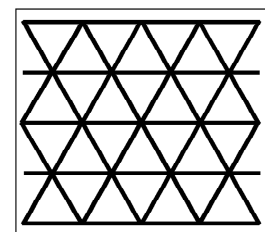
**Estratégia recomendada** para a avaliação da totalidade do elemento de planeza. Capacidade para avaliar o conteúdo harmónico relativo à forma, em ambas as direções

a) Malha retangular



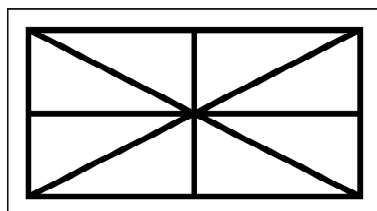
**Estratégia recomendada** para a avaliação da totalidade do elemento de planeza, se este for nominalmente circular.

b) Malha polar



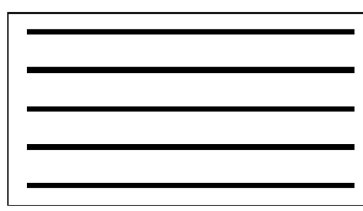
**Estratégia recomendada** em alternativa às duas estratégias anteriores.

c) Malha triangular



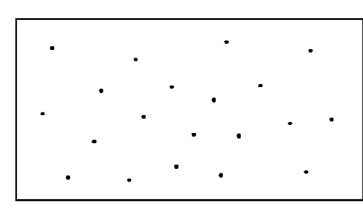
Estratégia rápida mas com capacidades limitadas para avaliar o conteúdo harmónico relativo à forma, segundo as direções definidas. Não há amostragem em grandes áreas. Só deverá ser utilizada se o conteúdo do maior comprimento de onda do elemento de planeza for negligenciável.

d) “Bandeira do Reino Unido”



Estratégia recomendada apenas se a informação sobre os harmónicos elevados for mais interessante numa das duas direções ortogonais.

e) Perfis paralelos



Estratégia não recomendada, a menos que apenas sejam requeridas estimativas aproximadas dos parâmetros de planeza. Capacidade limitada para avaliar o conteúdo harmónico de um elemento de planeza.

f) Por pontos

Figura 7.122 – Estratégias de extração para a avaliação da planeza. Adaptada da ISO 12781-2

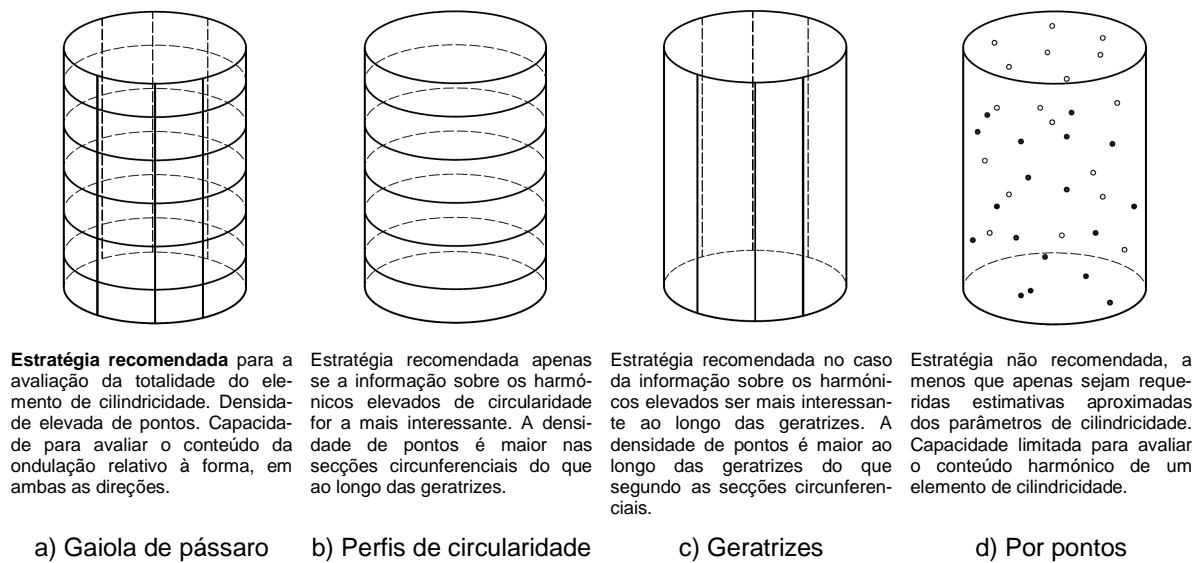


Figura 7.123 – Estratégias de extração para a avaliação de cilindridade. Adaptada da ISO 12180-2

Quando a extração é realizada através de qualquer uma das estratégias indicadas nas figuras 7.122 e 7.123, apenas se considera um pequeno número de pontos de amostragem do elemento plano ou do elemento cilíndrico. Por esta razão e por causa das diferentes concepções dos instrumentos de medição e das implementações específicas das estratégias de extração, podem verificar-se diferenças nos resultados de medição, a menos que tenha havido cuidado na seleção de um conjunto de pontos que seja adequado para representar o elemento plano ou cilíndrico, para os fins da avaliação específica.

Complementarmente, a norma ISO 14406 apresenta possíveis **estratégias de amostragem** (de extração) para superfícies com as seguintes geometrias nominais: esférica, plana, cilíndrica, helicoidal, de revolução, prismática e complexa (ver quadro 7.14 e figura 7.124):

Quadro 7.14 – Estratégias de amostragem para superfícies (ISO 14406)

Estratégias de amostragem	Superfícies						
	Esférica	Plana	Cilíndrica	helicoidal	De revolução	Prismática	Complexa
Malha ortogonal	X	X	X	X	X	X	X
Gaiola de pássaro			X	X	X	X	
malha polar		X					
Malha específica	X	X	X	X	X	X	X
Estratificada	X	X	X	X	X	X	X
Em hélice	X		X	X	X	X	X
Espiral		X					
Teia de aranha		X					
Pontos	X	X	X	X	X	X	X

Todas as linhas nos esquemas apresentados na figura 7.124 representam perfis. A amostragem deve ser realizada ao longo de cada perfil, numa dada sequência (não necessariamente equidistante) e não restrita aos pontos de interseção.

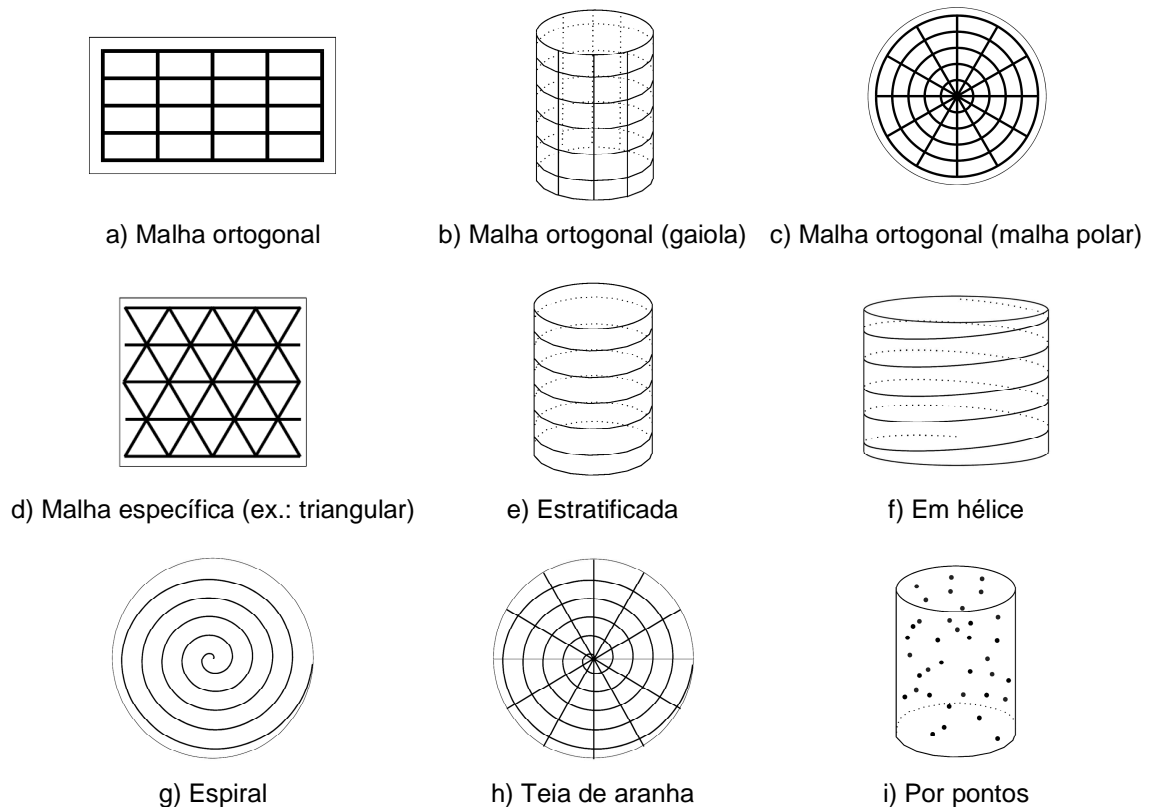


Figura 7.124 – Estratégias de amostragem. Adaptada da ISO 14406

A estratégia de amostragem a adotar deve ter em consideração a natureza do processo de fabricação, o tipo e a magnitude dos desvios de forma e a função prevista para a peça. No entanto, a norma BS 7172 e a referência [H1] apresentam regras genéricas para o estabelecimento de diferentes estratégias de amostragem consideradas adequadas para sistemas de apalpação contínua (*“scanning”*) e para dispositivos de apalpação ponto-a-ponto (*“probing”*). Para estes últimos, indicam também os números mínimos de pontos mais recomendados para diferentes elementos geométricos, tendo em conta as estratégias adotadas.

### 7.9.3 Filtragem

#### 7.9.3.1 Generalidades

A **filtragem** (*“filtration”*) é uma operação para elementos geométricos utilizada para criar um elemento não ideal a partir de outro elemento não ideal ou para transformar uma curva de variação noutra, através de uma redução do nível de informação (ISO 17450-1). Pode ser usada, por exemplo, para fazer uma separação de características de forma, de ondulação e de rugosidade de um elemento geométrico, em conformidade com critérios específicos.

Na especificação e avaliação de desvios de circularidade, por exemplo, o efeito da rugosidade deve ser eliminado ou atenuado através de uma filtragem, para evitar que o resultado da medição possa vir a ser significativamente falseado por esse efeito (ver exemplo na figura 7.125). Caso contrário, um cilindro perfeitamente circular, obtido por torneamento, apresentaria um desvio de circularidade derivado da altura de rugosidade da sua superfície [H1].

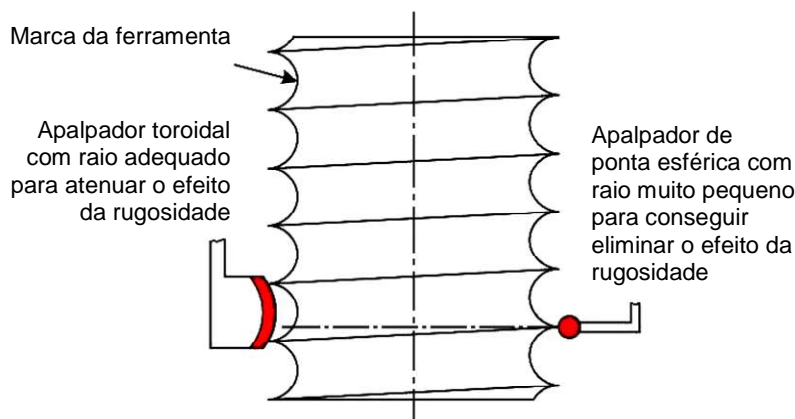


Figura 7.125 – Exemplo de filtragem mecânica proporcionada por um raio adequado do apalpador em contacto com uma superfície cilíndrica torneada. Adaptada de [L2]

Conforme já foi referido, uma extração de dados envolve sempre a aplicação de um certo processo de filtragem. Em complemento, poderá ou não ser aplicada uma **filtragem adicional** dos dados extraídos. Esta filtragem vai influenciar a definição das características geométricas de forma (de retitude, planeza, circularidade ou cilindridade) e os seus operadores de especificação, necessitando, por isso, de ser indicada de um modo inequívoco.

A norma ISO 16610-1 faz referência aos vários filtros atualmente disponíveis, que estão divididos em dois grandes tipos: filtros de perfil (2D) e filtros de superfície (“areal”) (3D). Por sua vez, cada um destes está repartido por três categorias: filtros lineares, filtros robustos e filtros morfológicos. As designações dos filtros normalizados e os respetivos símbolos, para utilização em indicações de requisitos geométricos, na documentação técnica de produtos, estão compilados no quadro 7.5.

Os desenvolvimentos no processamento do sinal analógico e digital determinaram fortemente o modo como a filtragem foi posta em prática na metrologia das superfícies. Mais recentemente, os progressos registados no processamento digital de imagem têm vindo a influenciar a metrologia computacional das superfícies. Em termos matemáticos e computacionais, a filtragem geométrica pode ser tratada como uma **convolução de funções** (em filtros lineares) ou uma **convolução de conjuntos** (em filtros morfológicos) [S5, R1, M4].

Os filtros de cada tipo podem ser hierarquizados pelo seu **índice de imbricação** (“*nesting index*”) que corresponde ao tamanho segundo o qual se faz a separação dos diferentes elementos. Este índice equivale ao tamanho dos furos de uma peneira (ISO 16610-1). O comprimento de onda de corte (“*cut-off wavelength*”) de um filtro gaussiano é um exemplo de um índice de imbricação. No caso de um

filtro morfológico, este índice corresponde ao tamanho do elemento estruturante (“*structuring element*”).

Atualmente, como não existem quaisquer especificações de filtragem, por omissão, definidas nas normas GPS, o **filtro adicional** a utilizar poderá ser um filtro linear (gaussiano, spline, onduletas, etc.) ou um filtro não linear (filtro morfológico, etc.), devendo os seus **componentes de especificação** [o tipo de filtro e o(s) índice(s) de imbricação] ser inscritos no indicador de tolerância, em conformidade com a secção 7.4.1.2.2 deste texto.

Presentemente, os **filtros lineares** são os filtros geométricos de utilização mais corrente em metrologia. Matematicamente, estes filtros baseiam-se na teoria dos operadores lineares. Os filtros lineares substituem cada ponto de um perfil ou de uma superfície por uma média pesada de pontos na sua vizinhança. O filtro gaussiano é um dos seus exemplos principais, em que a função peso é a função densidade de Gauss (ver exemplo na figura 7.126). Outros filtros lineares (filtros splines e filtros onduletas splines) diferem no modo como é feita esta média pesada [S4, K2].

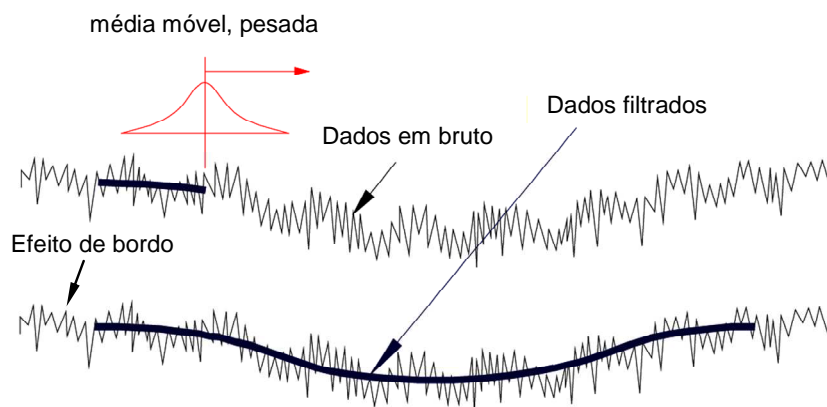


Figura 7.126 – Exemplo de aplicação de um filtro de perfil gaussiano. Adaptada de [M1]

Os **filtros gaussianos** e os **filtros splines** são definidos pelo seu comprimento de onda de corte e separam os componentes de alta e de baixa frequência (isto é, os componentes de onda curta e de onda longa) da superfície. Ajudam a analisar os comportamentos harmónicos relacionados com o processo de fabricação e a medição dos elementos geométricos. No entanto, devido ao efeito do cálculo da média, estes filtros poderão atenuar fortemente ou mesmo eliminar os pontos mais proeminentes da superfície, com influência nos aspetos de contacto, não sendo adequados para elementos utilizados como referências especificadas e em ajustamentos, ver exemplo na figura 7.127, [H1, L2].

Os **filtros splines** funcionam de um modo análogo aos filtros gaussianos, mas não apresentam algumas das suas desvantagens (efeitos de bordo, distorção de superfícies oblíquas, etc.). No entanto, atualmente, a sua gama de aplicações não está ainda bem definida.

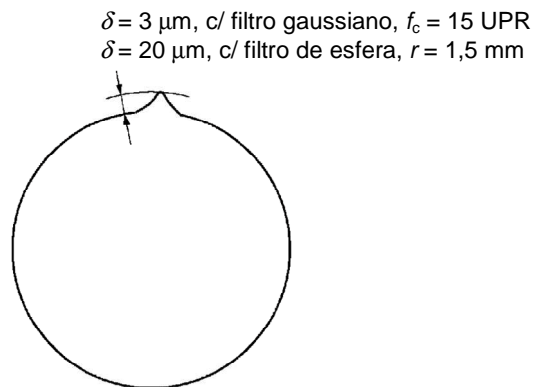
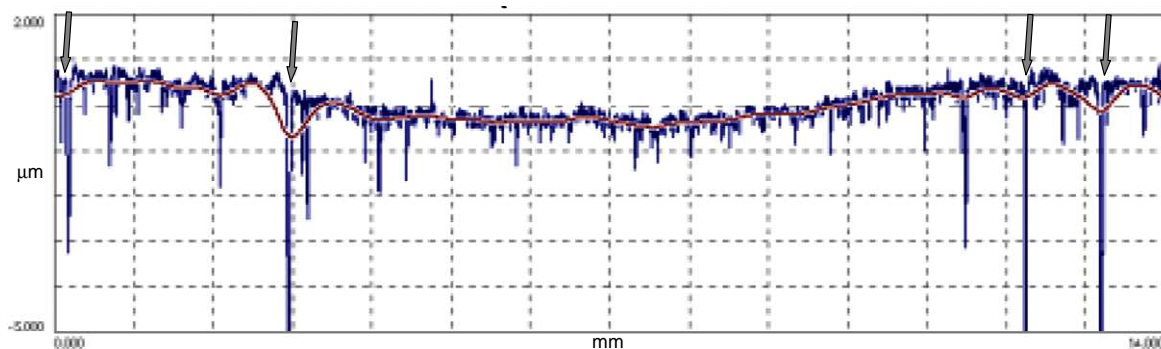


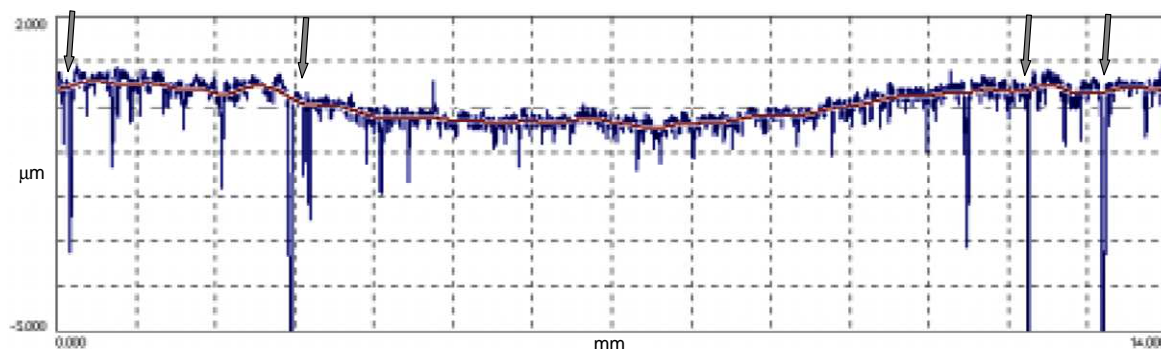
Figura 7.127 – Exemplo de avaliação da altura máxima de um desvio de forma restrito, com um filtro de perfil gaussiano e com um filtro morfológico. Adaptada de [H1]

Os **filtros onduletas splines** permitem localizar e identificar as porções locais atípicas (“*outliers*”) dos elementos. Por outro lado, não são fáceis de interpretar e, atualmente, a sua gama de aplicações não está ainda bem definida.

Os **filtros robustos** fornecem respostas com menor distorção face a fenómenos específicos registados nos dados de entrada, comparativamente às obtidas com outros filtros alternativos. Logo, não criam distorções nas porções locais atípicas dos elementos, ao contrário dos filtros RC, gaussianos não robustos e splines que são sensíveis aos “*outliers*” e adulteram o resultado da medição [H1, M1], ver exemplo na figura 7.128.



a) Filtro gaussiano sensível aos valores amostrados atípicos



b) Filtro robusto não sensível aos valores amostrados atípicos

Figura 7.128 – Comparação dos comportamentos de um filtro de perfil robusto e de um filtro de perfil gaussiano. Adaptada de [M1]



Os **filtros morfológicos** (filtros de esfera, filtros de disco, etc.) são baseados em operações matemáticas radicadas nas somas de Minkowski (ISO 16610-40). São particularmente atrativos para aplicações metrológicas onde as superfícies são varridas por intermédio de uma sonda tátil que tem uma extremidade com uma configuração particular. Estes filtros podem ainda ser divididos em “filtros de abertura” e “filtros de fecho” (ver exemplo na figura 7.129).

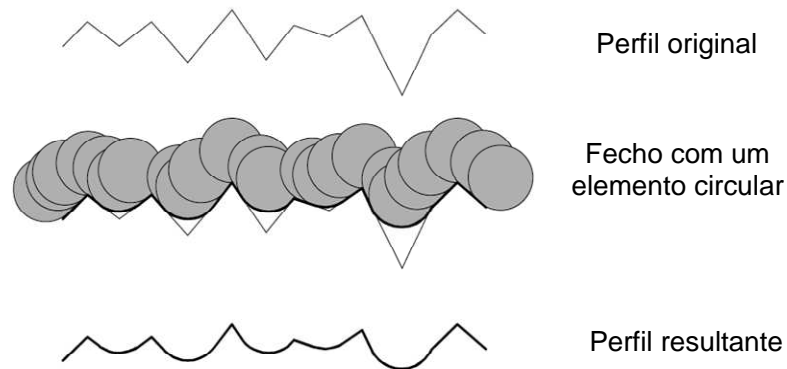
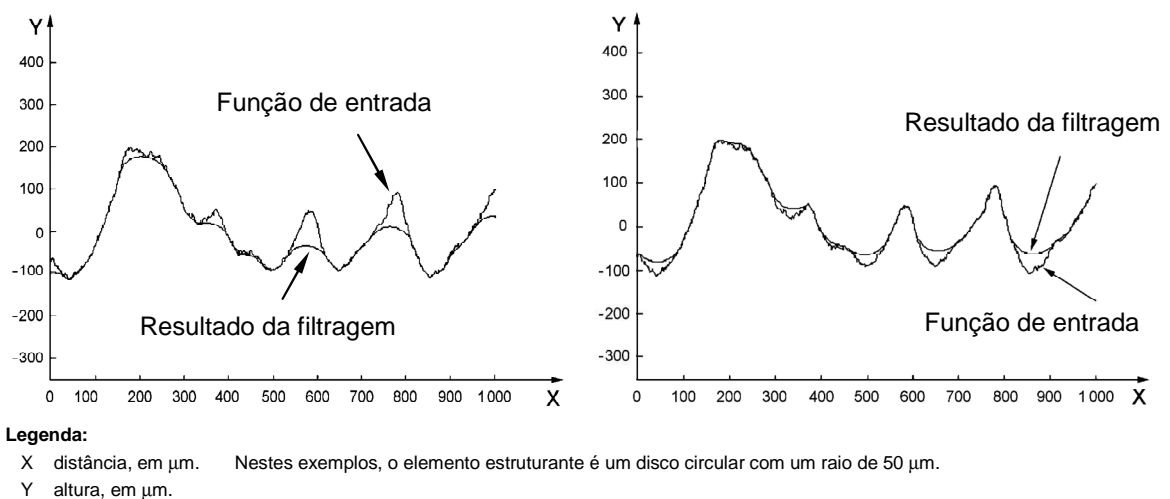


Figura 7.129 – Exemplo de um filtro de perfil morfológico de fecho. Adaptada de [M1]

Os “filtros de abertura” eliminam os picos e conservam os vales da superfície. Os “filtros de fecho” conservam os pontos mais proeminentes da superfície e eliminam os vales estreitos onde a esfera ou o disco não pode penetrar (ver exemplos na figura 7.130). Estes últimos poderão ser utilizados em referências especificadas e ajustamentos [S4, H1, S5].



a) Filtro de abertura

b) Filtro de fecho

Figura 7.130 – Exemplos de resultados da aplicação de diferentes filtros de perfil morfológicos (ISO 16610-40)

Os filtros morfológicos podem fornecer melhores resultados na caracterização funcional de estados de superfície, uma vez que, por um lado, estão intimamente relacionados com requisitos funcionais das peças, tais como o escorregamento, a aderência, a vedação, o contacto e a montagem e, por outro, podem proporcionar um sistema de referência comum que permita associar todas as características geométricas, incluindo tamanho, orientação, forma, ondulação e rugosidade [L2].

A norma ISO 16610-1 transmite uma visão geral mais desenvolvida sobre as vantagens e inconvenientes dos diferentes filtros considerados nos vários documentos normativos da série ISO 16610. No entanto, continuam a decorrer trabalhos de investigação sobre aplicações adequadas dos filtros, de acordo com as necessidades funcionais das peças.

A filtragem proporcionada pelo apalpador não é suficiente, por si só, para suavizar um perfil. Em certas circunstâncias, pode mesmo criar um conteúdo espúrio de alta-frequência e, portanto, fornecer valores incorretos. Para corrigir esse problema, pode utilizar-se um filtro passa-baixo (*“long wave-pass filter”*) (ISO 12180-2).

Presentemente, as normas ISO, editadas em 2011, relativas à indicação dos operadores de especificação completos, para as características geométricas de forma de elementos integrais completos, do tipo linha reta, plano, circunferência e cilindro, utilizam o **filtro de perfil gaussiano** (FPLG), uma vez que este corresponde, de acordo com elas, ao atual estado da arte. Este filtro apresenta algumas insuficiências, tais como, por exemplo, o poder distorcer, em vez de eliminar, alguns elementos de rugosidade e o poder distorcer, em vez de transmitir corretamente, alguns elementos de ondulação. Nas normas ISO 12780, ISO 12781, ISO 12181 e ISO 12180, prevê-se que os novos filtros em desenvolvimento, no seio da ISO, alguns deles já atrás referidos, irão fornecer soluções melhores para várias destas questões.

### 7.9.3.2 Banda de transmissão – filtros de perfil gaussianos

Os **filtros de perfil gaussianos** (FPLG) são filtros lineares sem alteração de fase (*“phase correct filters”*), também designados por filtros de fase nula, que separam os perfis em componentes de comprimento de onda longa e comprimentos de onda curta e não criam desfasamentos que conduzam a distorções assimétricas do perfil (ISO 16610-20). A sua característica permite a transmissão de 50 % da amplitude do perfil, para o comprimento de onda de corte, já que os componentes de comprimento de onda curta e longa são separados e podem voltar a ser combinados sem alterar o perfil de superfície (ISO 16610-21).

Os perfis de superfície podem ser abertos ou fechados. Um **perfil aberto** é um perfil de superfície de comprimento finito, com duas extremidades. Um **perfil fechado** é um perfil de superfície de comprimento finito, unido e sem extremidades (ISO 16610-1).

Um perfil fechado retém desvios na direção radial, mas é insensível ao diâmetro real do elemento geométrico. Um elemento nominalmente circular pode ser visto como composto por diferentes harmónicos, especificados em termos de ondulações por rotação (UPR). Ao basear a análise em ondulações por rotação, em vez de recorrer a comprimentos de onda do perfil da superfície, deixa de haver necessidade de se contabilizar o diâmetro do elemento.

Por conseguinte, o processo de filtragem, no caso de perfis de circularidade é cego relativamente aos comprimentos de onda do perfil de superfície, expressos em unidades de comprimento, e, consequentemente, ao diâmetro do elemento. Os valores de corte ("*cut-off*") são especificados em ondulações por rotação e o filtro divide um perfil em diferentes larguras de banda que contêm diferentes ondulações por rotação. De notar que ondulações por rotação (UPR) é um termo de frequência. A avaliação da circularidade é baseada em frequências, enquanto a avaliação do perfil de superfície aberto é baseada em comprimentos de onda [M4].

O **comprimento de onda de corte** ("*cut-off wavelength*") é o comprimento de onda de um perfil sinusoidal para o qual 50 % da amplitude é transmitida pelo filtro de perfil, aplicado à linha extraída (ISO 16610-21). O comprimento de onda de corte do filtro aplicado à linha circunferencial extraída denomina-se de **corte de ondulação** ("*ondulation cut-off*"), ver ISO 12181-1.

O filtro que transmite um intervalo de ondulações sinusoidais cuja razão entre a amplitude de saída e a amplitude de entrada está definida, ao mesmo tempo que atenua (isto é, reduz) essa razão para as ondulações situadas fora desse intervalo, numa das extremidades deste ou em ambas, designa-se por **filtro de perfil** ("*profile filter*") (ISO 12780-1), quando é utilizado num perfil aberto, e por **filtro de onda** ("*wave filter*") (ISO 12181-1), quando é utilizado num perfil fechado.

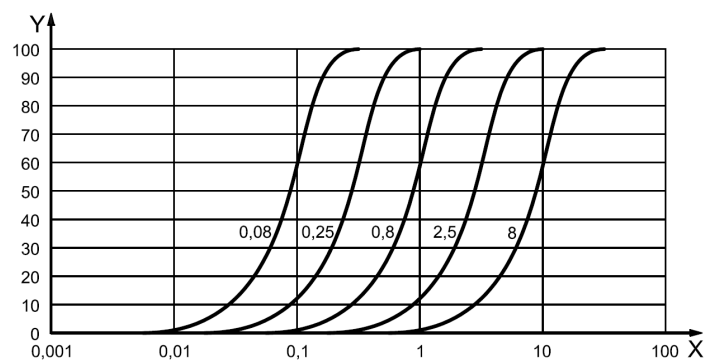
A **banda de transmissão**, para os perfis de retitude ou de circularidade, é a banda de ondulações de um perfil sinusoidal que são transmitidas acima de uma percentagem especificada pelo filtro (geralmente 50 %), definida pelos valores máximo e mínimo, respetivamente, do comprimento de onda de corte (em mm) ou do corte de ondulação (em UPR).

#### 7.9.3.2.1 Filtros passa-baixo

O filtro passa-baixo deixa passar as baixas frequências, isto é, deixa passar os comprimentos de onda longos ("*long wave pass filter*").

##### 1) Perfis abertos (elementos abertos)

De acordo com a ISO 12780-2, para **perfis abertos** (p. ex. linhas retas, planos e cilindros na direção axial), o filtro passa-baixo deve ser um filtro sem alteração de fase (ou filtro de fase nula), em conformidade com a ISO 11562, atual ISO 16610-21, que transmite ondas a partir de um comprimento de onda infinito e atenua progressivamente as ondulações do perfil, na zona de ondulação à volta do comprimento de onda de corte,  $\lambda_c$ , (em mm), ver figura 7.131.

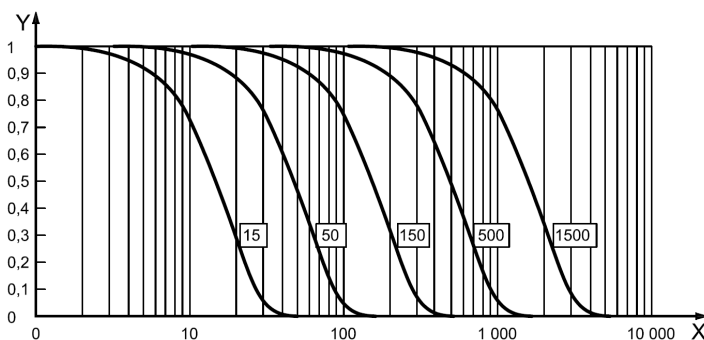
**Legenda:**

X – comprimento de onda, em mm  
Y – transmissão, em %

Figura 7.131 – Característica de transmissão de um filtro passa-baixo para os comprimentos de onda de corte,  $\lambda_c$ , assinalados (ISO 12780-2)

## 2) Perfis fechados (elementos fechados)

De acordo com a ISO 12181-2, para **perfis fechados** (p. ex. cilindros na direção circunferencial, toros e esferas), o filtro passa-baixo deve ser um filtro sem alteração de fase (em conformidade com a ISO 11562) que transmite ondas a partir de 1 UPR e atenua progressivamente as ondulações do perfil, na zona de ondulação à volta da frequência de corte,  $f_c$ , (em UPR), ver figura 7.132.

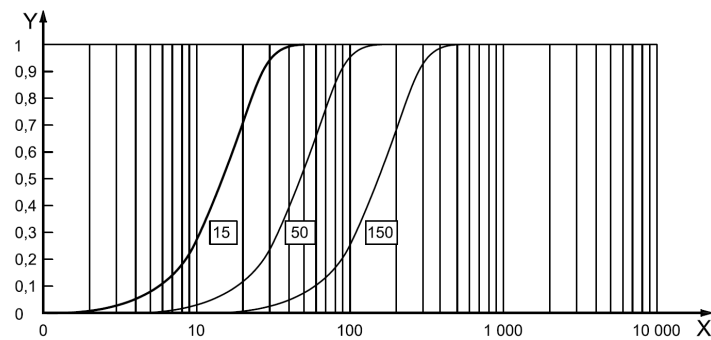
**Legenda:**

X – frequências, em ondulações por rotação (UPR)  
Y – transmissão, em %

Figura 7.132 – Característica de transmissão de um filtro passa-baixo, para as frequências de corte,  $f_c$ , (em UPR) assinaladas (ISO 12181-2)

### 7.9.3.2.2 Filtros passa-alto

O filtro passa-alto deixa passar as altas-frequências, isto é, deixa passar os comprimentos de onda curtos (*“short wave pass filter”*). De acordo com a ISO 12181-2, para **perfis fechados** (elementos fechados), o filtro passa-alto deve ser um filtro sem alteração de fase (em conformidade com a ISO 11562) que atenua as ondas desde 1 UPR até à frequência de corte (em UPR), transmitindo assim ondulações mais pequenas (frequências mais elevadas) do que a frequência de corte,  $f_c$ , (em UPR), ver figura 7.133.

**Legenda:**

X – frequências, em ondulações por rotação (UPR)  
Y – transmissão, em %

Figura 7.133 – Característica de transmissão de um filtro passa-alto, para as frequências de corte,  $f_c$ , (em UPR) assinaladas (ISO 12181-2)

### 7.9.3.2.3 Comprimentos de onda de corte

O **filtro de perfil** determina o intervalo de ondulações sinusoidais periódicas do elemento, incluídas na avaliação da retitude. O intervalo é delimitado por valores retirados do quadro 7.15. Este quadro fornece também o espaçamento máximo dos pontos de amostragem, que deve ser utilizado para a linha extraída, e o raio,  $r$ , da extremidade do apalpador, necessário para evitar a distorção do perfil de retitude, resultante da influência da extremidade do apalpador.

Quadro 7.15 – Valores de corte (“cut-off”) (ISO 12780-2)

Filtros passa-baixo (“long wave-pass filters”)		
Filtro que transmite desde um comprimento de onda infinito até $\lambda_c$	Espaçamento máximo dos pontos de amostragem	Raio máximo, $r$ , da extremidade do apalpador <sup>1)</sup>
8	1,14	5
2,5	0,357	1,5
0,8	0,114	0,5
0,25	0,035 7	0,15
0,08	0,011 4	0,05

<sup>1)</sup> Quando o requisito do raio máximo,  $r$ , da extremidade do apalpador é satisfeito, este raio é de tamanho comparável ao comprimento das ondulações mais curtas transmitidas pelo filtro do perfil. Tal é consistente com os requisitos do raio da extremidade do apalpador, para instrumentos de medição dos estados de superfície (ver ISO 3274).

O número de pontos requerido corresponde a sete pontos de amostragem por cada “cut-off wavelength” (comprimento de onda de corte,  $\lambda_c$ ), que é o número mínimo teórico de pontos a avaliar. Se for utilizado um valor de corte diferente dos indicados no quadro 7.15, o espaçamento máximo dos pontos de amostragem e o raio máximo da extremidade do apalpador a aplicar podem ser calculados a partir das relações estabelecidas nesse mesmo quadro.

### 7.9.3.2.4 Frequências de corte em UPR

O **filtro de onda** (“wave filter”) determina o intervalo de ondulações sinusoidais periódicas por rotação (UPR) do elemento, incluídas na avaliação da circularidade. O intervalo é delimitado por valores

retirados do quadro 7.16. Este quadro fornece também o número mínimo dos pontos de amostragem, que deve ser utilizado para a linha circunferencial extraída, e a razão mínima entre o diâmetro do elemento e o raio da extremidade ( $d:r$ ), necessária para evitar a distorção do perfil de circularidade, resultante da influência da extremidade do apalpador.

Quadro 7.16 – Valores limites de ondulações por rotação (UPR) (ISO 12181-2)

Filtros passa-baixo (“ <i>long wave-pass filters</i> ”)		
Filtro que transmite desde 1 UPR até $f_c$	Número mínimo de pontos de amostragem	Razão $d:r$ mínima <sup>1)</sup>
15	105	5
50	350	15
150	1 050	50
500	3 500	150
1 500	10 500	500
<sup>1)</sup> A razão $d:r$ é a relação entre o diâmetro, $d$ , da circunferência de referência e o raio, $r$ , da extremidade do apalpador. Se a razão $d:r$ for menor do que o valor especificado, as ondulações UPR maiores do elemento, dentro da banda de transmissão, vão ser distorcidas pela influência da extremidade do apalpador.		

Se for especificado um filtro passa-alto (“*short wave-pass filter*”), deve também indicar-se um filtro passa-baixo (“*long wave-pass filter*”), em conjunção com ele, de modo a obter-se uma banda de transmissão UPR bem definida.

Uma característica dos filtros de onda, analógicos e digitais, é a de terem uma razão (entre as amplitudes de saída e de entrada) que depende apenas do comprimento de onda e é independente da amplitude (do perfil sinusoidal), em contraste com os métodos de filtragem mecânica (p. ex. por meio do apalpador), que são influenciados pelo comprimento de onda e também pela amplitude (ISO 12181-2).

No caso de não ter sido especificado um filtro passa-baixo, os desvios de circularidade avaliados não serão comparáveis. O raio da extremidade,  $r$ , atuará então, muitas vezes, como um filtro passa-baixo indefinido. Em muitos instrumentos de medição, tal funciona como um filtro passa-baixo máximo incorporado, que atuará se não forem efetuados quaisquer outros ajustes.

Para uma dada banda de transmissão, aplica-se o número de pontos de amostragem e a razão  $d:r$  mínima indicados para o filtro passa-baixo. Por exemplo, se for utilizada uma banda de transmissão de 50 a 500 UPR, utilizam-se 3 500 pontos de amostragem e uma razão  $d:r$  de pelo menos 150. Se não tiver sido especificado o filtro passa-baixo, devem utilizar-se os valores correspondentes a um filtro de 1 500 UPR.

Quando o requisito  $d:r$  for satisfeito, o raio da extremidade do apalpador será de tamanho comparável ao comprimento de onda das ondulações mais curtas transmitidas pelo filtro de onda, o que é consistente com o raio da extremidade do apalpador para instrumentos de medição dos estados de superfície (ver ISO 3274).

De acordo com comentários dos peritos alemães do CEN/TC 290, efetuados em 2006 [C1], os valores dos parâmetros indicados nas normas ISO 12780-2, ISO 12781-2, ISO 12180-2, ISO 12181-2 são valores derivados de uma aproximação teórica para separar a forma e a ondulação da rugosidade, sem refletir os requisitos funcionais reais nos elementos geométricos da peça e os processos de fabricação aplicados.

Na opinião dos peritos citados, enquanto o número mínimo de 7 pontos de amostragem por ondulação é matematicamente correto, o número de ondulações por rotação (UPR), relacionado com o diâmetro da circunferência de referência (ver quadro 7.16), é muito crítico, de um ponto de vista funcional. Segundo eles, trabalhos de investigação desenvolvidos na indústria alemã permitiram concluir que os valores do quadro 7.16 são absolutamente ilusórios, uma vez que o número de ondulações por rotação está dependente dos requisitos funcionais e da capacidade do processo e não do diâmetro da peça. Na maioria dos casos estudados, usando os valores do “operador de especificação ISO”, os resultados da medição obtidos serão mais pequenos, uma vez que os componentes de alta-frequência, que afetam a função da superfície, serão suprimidos por filtragem.

### 7.9.3.3 Sistema de apalpação

Em conformidade com os operadores de especificação ISO, atualmente em vigor, para as características geométricas de forma, o sistema de apalpação normalizado é um sistema por contacto, em que a geometria teoricamente exata da extremidade do apalpador é uma esfera e a força de apalpação deve ser de 0 N.

Estas características do sistema, em conjunto com os valores do raio,  $r$ , máximo da extremidade do apalpador (ver quadro 7.15) ou da razão  $d:r$  mínima (ver quadro 7.16), atrás indicados, têm por objetivo contribuir para **uma definição do operador de especificação com uma incerteza muito pequena**.

Se for utilizado um raio da extremidade do apalpador com um valor mais pequeno do que o especificado na norma, para um dado comprimento de corte (“*cut-off*”), o valor medido resultante será geralmente mais elevado (acentuando o efeito da rugosidade), embora, esse efeito seja normalmente pouco significativo. Se for utilizado um raio da extremidade maior, o valor medido resultante será geralmente mais baixo (eliminando ou atenuando o efeito da rugosidade). A importância desta variação está muito dependente da superfície medida (ISO 12780-2).

Por sua vez, a escolha de uma força de medição de 0 N destina-se a permitir a eliminação dos efeitos da deformação elástica da peça, ao nível do operador de especificação, embora, na prática, tal não seja aplicável em sistemas de contacto [C1]. Nas superfícies metálicas com uma espessura adequada, o efeito das forças de medição correntes é negligenciável. Na norma ISO 4291, relativa à avaliação de desvios de circularidade por meio de instrumentos de contacto, estabelece-se que a

força de medição deve ser ajustável até um máximo de 0,25 N, de modo a assegurar um contacto contínuo entre o apalpador e a superfície a medir.

A generalidade dos conceitos expostos só têm uma aplicação plena em sistemas de apalpação contínua ("*scanning*"), que são os ideais para a medição de desvios geométricos de forma. No âmbito da avaliação de desvios de circularidade, a ISO 4291 especifica valores entre 0,25 e 25 mm, para o raio máximo da extremidade do apalpador.

De acordo com os comentários dos peritos alemães atrás citados [C1], a especificação de um raio da extremidade do apalpador de  $r = 0,5$  mm poderá ser razoável num contexto geral. No entanto, para aplicações industriais, o diâmetro da extremidade do apalpador é um compromisso entre resolução e avaliação. Logo, para fins práticos, é mais comum a utilização de raios maiores.

Por sua vez, em sistemas de apalpação ponto-a-ponto (apalpação descontínua - "*probing*"), utilizam-se apalpadores de ponta esférica, em rubi, com valores de raio,  $r$ , entre 0,15 e 4 mm, embora, em mais de 80 % das aplicações correntes, as medições sejam efetuadas recorrendo a apalpadores de ponta esférica com raios,  $r$ , compreendidos entre 1 e 3 mm [C4]. Segundo Henzold [H1], na prática, o efeito da rugosidade é filtrado através da ação da extremidade (esfera) do apalpador do instrumento de medição. Com comparadores ("*dial gauges*"), o valor do raio da ponta esférica é normalmente de  $r = 1,5$  mm.

Em casos de litígio sobre se a peça satisfaz ou não as tolerâncias geométricas inscritas no desenho, a taxa de inclusão dos desvios de ondulação pode ser decisiva. Com a utilização de instrumentos de medição com dispositivos de filtragem, recomenda-se a utilização de um apalpador de ponta esférica de raio  $r = 0,5$  mm. Quando só há instrumentos sem dispositivos de filtragem, recomenda-se a utilização de um apalpador de ponta esférica de raio  $r = 1,5$  mm. Com superfícies muito rugosas poderá ser necessário um raio maior. Para ranhuras e furos pequenos, poderá ter de ser acordada a utilização de apalpadores de ponta esférica com raios mais pequenos [H1].

Para lidar com os problemas correntes a nível industrial, os já referidos peritos alemães do CEN/TC 290 [C1] sugeriram também a utilização alternativa do guia VDI/VDE 2631 – Parte 9, como documento orientador para a especificação de medições de características geométricas de forma. Outras partes deste guia VDI/VDE dão informações sobre como especificar em conformidade com as necessidades e a capacidade do processo.

### **7.9.3.4 Alguns exemplos do papel desempenhado pela filtragem na especificação geométrica das superfícies**

As diferentes funções de uma peça podem interagir com a sua superfície de modos muito diferenciados. Algumas funções poderão depender dos pormenores mais finos, existentes na superfície, ao passo que outras poderão ser função apenas da configuração geral dessa superfície.



Os filtros são utilizados para atenuar algum nível de detalhe num elemento, permitindo assim estabelecer a especificação que melhor defina os requisitos para os restantes pormenores da superfície. Filtros diversos removem diferentes tipos de pormenores e podem ser utilizados para melhorar a comunicação de funções distintas, através da especificação geométrica. Alguns filtros tendem a menosprezar os extremos e a focar-se no nível médio da superfície, enquanto outros têm tendência a concentrar-se nos seus picos mais elevados ou nos seus vales mais profundos. A seleção do filtro que melhor descreve as necessidades funcionais de uma superfície depende exclusivamente da função desta. Os dois exemplos seguintes, retirados do ISO/DIS 1101, permitem ilustrar alguns dos conceitos expostos.

No primeiro exemplo apresentado na figura 7.134, pode observar-se a representação de um perfil aberto e não filtrado, de uma linha numa superfície, ampliado e com anamorfose (a ampliação vertical é maior do que a ampliação horizontal), num plano normal à superfície considerada. Esta representação fornece uma imagem distorcida do perfil, fazendo-o parecer mais rugoso do que aquilo que ele é na realidade. As figuras 7.135 a 7.137, pretendem mostrar os efeitos da aplicação de diferentes filtros a este perfil.

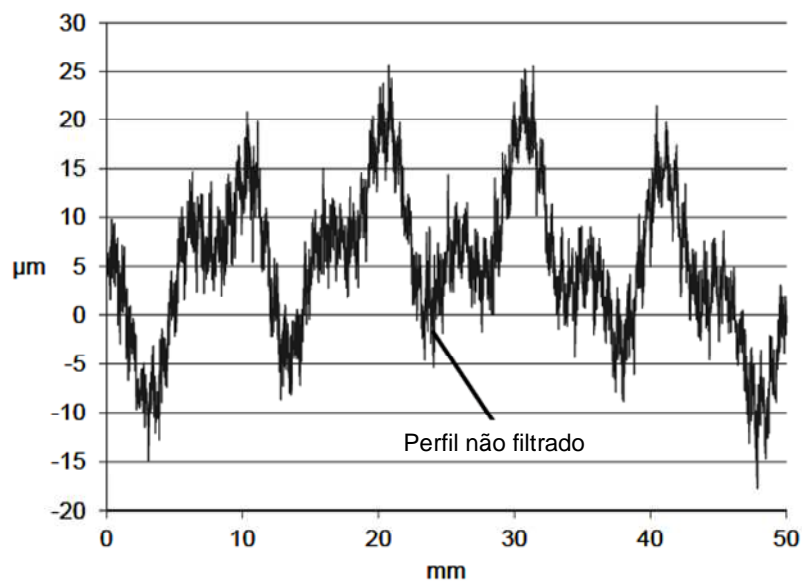


Figura 7.134 – Perfil de superfície não filtrado – 1º exemplo (ISO/DIS 1101)

Na figura 7.135, são visíveis os efeitos resultantes da aplicação, a este perfil, de dois filtros de perfil gaussianos (FPLG) passa-baixo, ISO 16610-21, com índices de imbricação (comprimentos de onda de corte) diferentes.

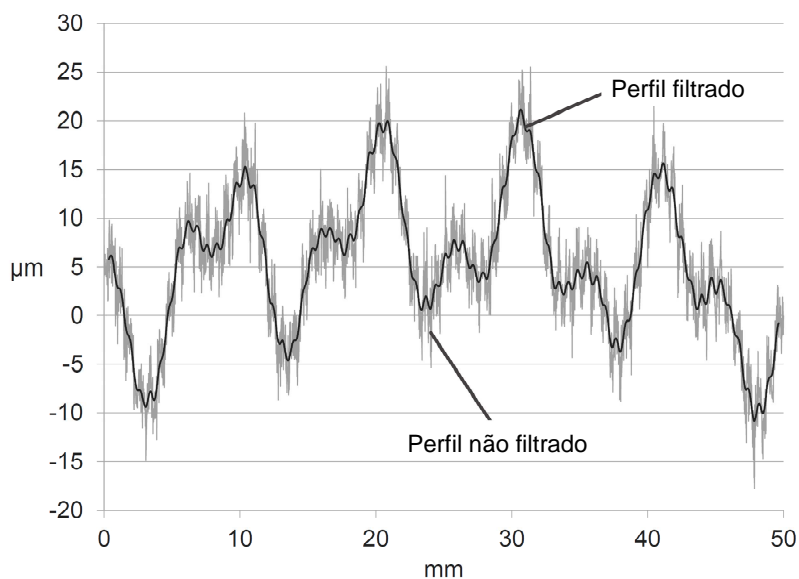
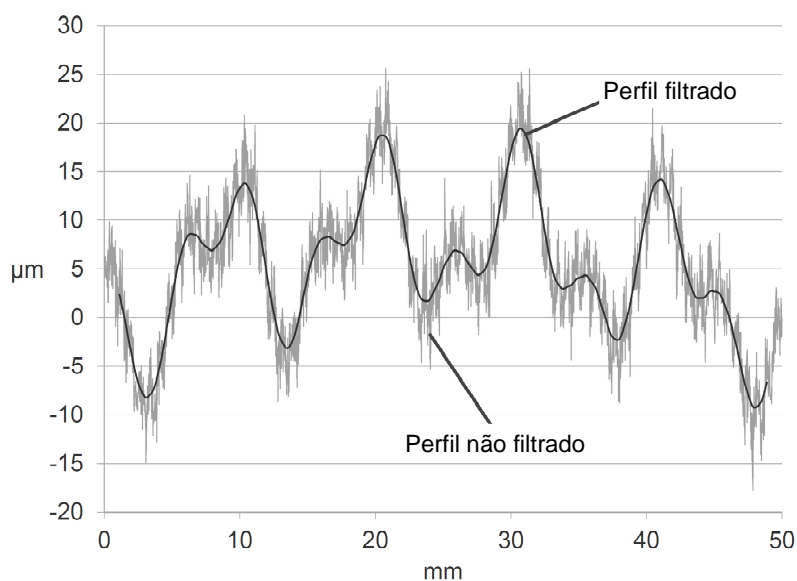
a) Filtro de perfil gaussiano passa-baixo com  $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ b) Filtro de perfil gaussiano passa-baixo com  $\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$ 

Figura 7.135 – Perfil de superfície filtrado com filtros gaussianos – 1º exemplo (ISO/DIS 1101)

O perfil filtrado da figura 7.135 a) apresenta um conteúdo harmónico maior do que o da figura 7.135 b), mas a forma global destes dois perfis e a amplitude dos seus desvios são parecidas. Com este perfil original, os diferentes comprimentos de corte,  $\lambda_c$ , utilizados não produziram diferenças significativas nos dois perfis resultantes, apresentando ambos uma altura total de perfil com uma amplitude de cerca de  $30 \mu\text{m}$ . Pode constatar-se também que os filtros gaussianos, tal como os filtros splines e os filtros onduletas, criam um perfil filtrado que passa pelo meio do perfil original.

A figura 7.136 apresenta o perfil resultante da aplicação, ao perfil original da figura 7.134, de um filtro de perfil morfológico, de disco de fecho (FPMCD), ISO 16610-41, em que o elemento estruturante é um disco de raio  $r = 0,5$  mm. Um filtro de disco de fecho simula a rotação de um disco, de determinado diâmetro, sobre a superfície. Desse modo, o disco vai contactar todos os pontos mais elevados da superfície, mas não será capaz de penetrar nos vales mais profundos, que serão assim eliminados do perfil resultante.

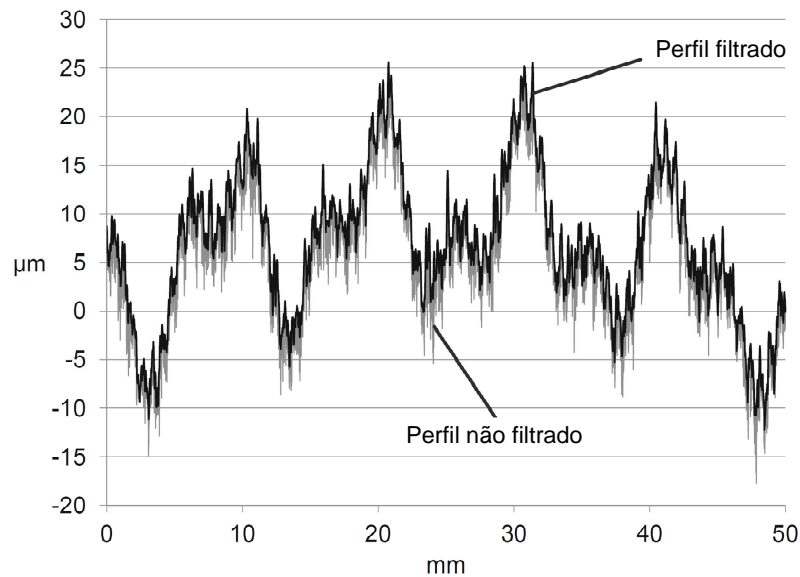


Figura 7.136 – Perfil de superfície filtrado com um filtro morfológico de disco de fecho – 1º exemplo (ISO/DIS 1101)

O filtro de disco de fecho é também um filtro passa-baixo que elimina certos pormenores de onda curta do perfil. Neste caso, o perfil filtrado resultante tem uma altura total com uma amplitude de cerca de  $35 \mu\text{m}$  mas, contrariamente ao filtro gaussiano, conserva os picos mais elevados da superfície, o que é útil se a função depender da posição destes.

A figura 7.137 apresenta o perfil resultante da aplicação de um filtro envolvente (“*hull*”), ao perfil original da figura 7.134. Um filtro envolvente é equivalente ao estiramento de um pedaço de borracha sobre a superfície. Este filtro conserva os picos mais elevados do perfil, ligando-os através de linhas retas (para o caso dos perfis e por meio de facetas triangulares, para o caso das superfícies).

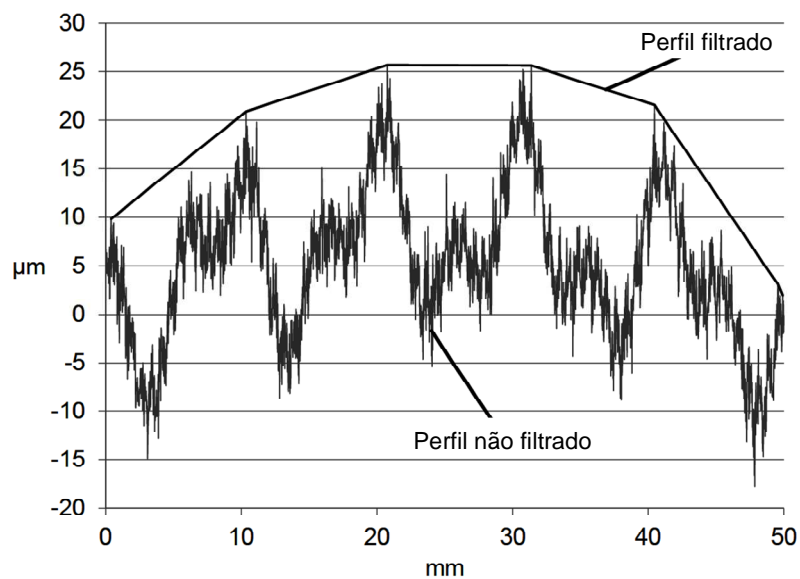


Figura 7.137 – Perfil de superfície filtrado com um filtro envolvente convexa (“convex hull”) – 1º exemplo (ISO/DIS 1101)

O filtro envolvente convexa (“convex hull”) é também um filtro passa-baixo que elimina todos os pormenores no perfil, considerando apenas os picos mais elevados. Neste caso, o perfil filtrado resultante tem uma altura total com uma amplitude de cerca de 25 μm.

Por sua vez, o segundo exemplo, apresentado na figura 7.138, é constituído por um perfil de superfície, aberto e não filtrado, diferente do anterior (ver figura 7.134), com o mesmo comprimento daquele (50 mm) e uma altura total com uma amplitude um pouco superior a 40 μm, mas em que a estrutura da sua superfície é diferente.

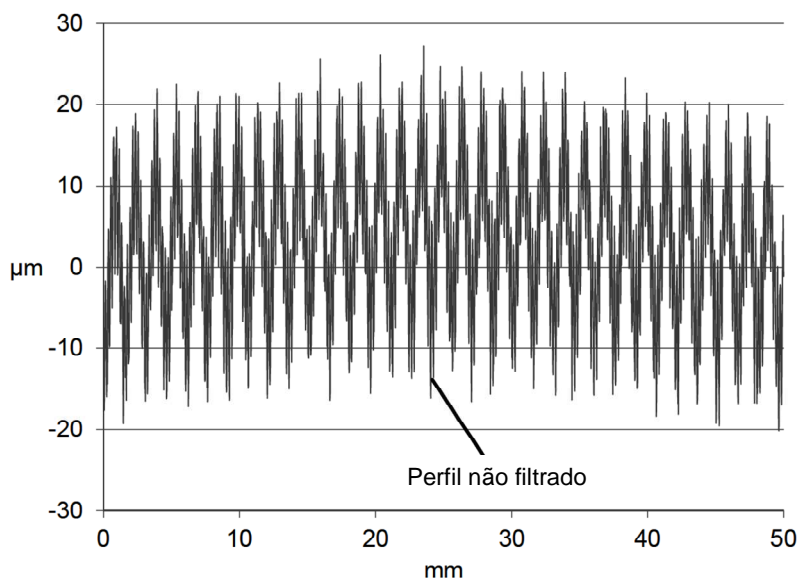
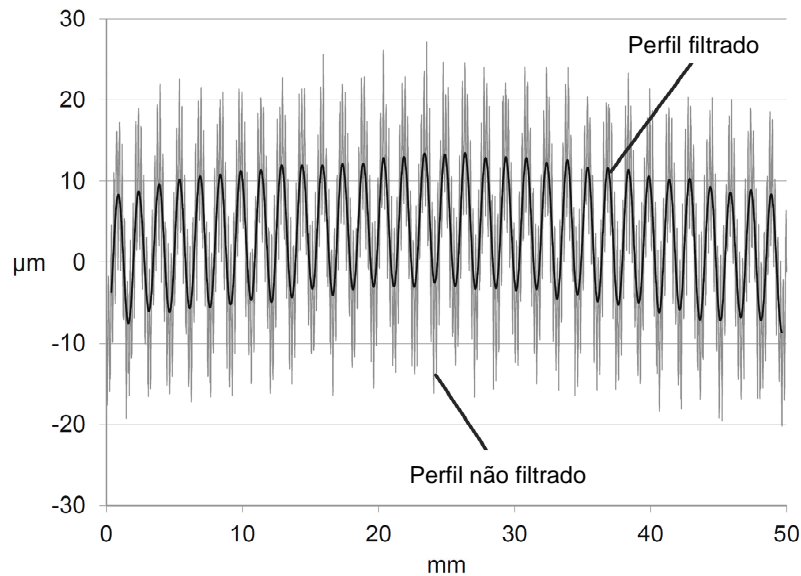


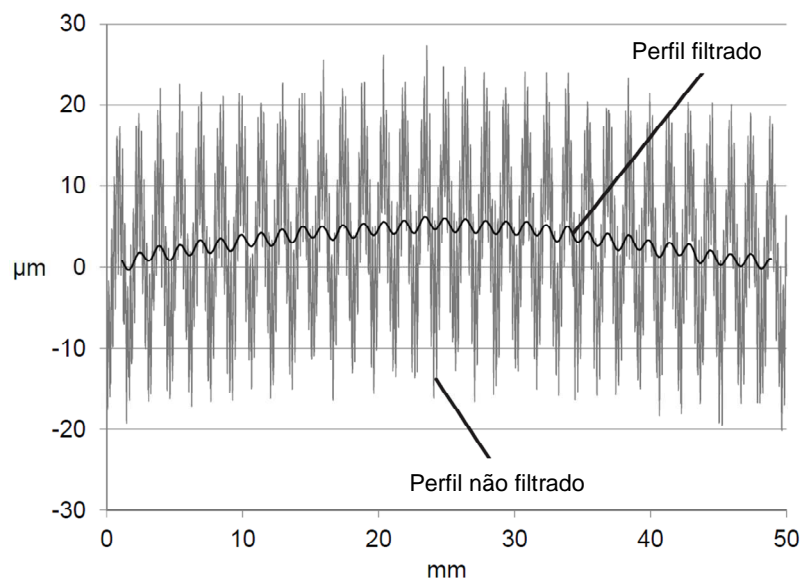
Figura 7.138 – Perfil de superfície não filtrado – 2º exemplo (ISO/DIS 1101)

Quando avaliados sem terem sido submetidos a uma filtragem prévia, os perfis das figuras 7.134 e 7.138 estariam ambos em conformidade ou em desconformidade com o mesmo conjunto de especificações de requisitos.

Na figura 7.139, são visíveis os efeitos resultantes da aplicação, a este perfil, dos dois filtros de perfil gaussianos (FPLG) passa-baixo, com índices de imbricação (comprimentos de onda de corte) diferentes, já referenciados no exemplo anterior.



a) Filtro de perfil gaussiano passa-baixo com  $\lambda_c = 0,8$  mm



b) Filtro de perfil gaussiano passa-baixo com  $\lambda_c = 2,5$  mm

Figura 7.139 – Perfil de superfície filtrado com filtros gaussianos – 2º exemplo (ISO/DIS 1101)

Também neste novo exemplo, o perfil filtrado da figura 7.139 a), com o filtro gaussiano de comprimento de corte menor, apresenta um conteúdo harmônico maior do que o do perfil da

figura 7.139 b), mas agora as alturas totais do perfil têm amplitudes bastante diferentes. O perfil filtrado da figura 7.139 a) apresenta uma amplitude da altura total de cerca de 20  $\mu\text{m}$ , enquanto o da figura 7.139 b) têm uma amplitude de apenas 5  $\mu\text{m}$ . Logo, se, ao contrário do perfil da figura 7.134, o perfil da figura 7.138 for aceitável de um ponto de vista funcional, então o filtro gaussiano com um comprimento de corte  $\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$  permitirá distingui-los, enquanto um filtro gaussiano com um comprimento de corte  $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$  mostrará apenas uma diferença marginal entre ambos os perfis.

A figura 7.140 apresenta o perfil resultante da aplicação, ao perfil original da figura 7.138, de um filtro de perfil morfológico, de disco de fecho (FPMCD), em que o elemento estruturante é um disco de raio  $r = 0,5 \text{ mm}$ .

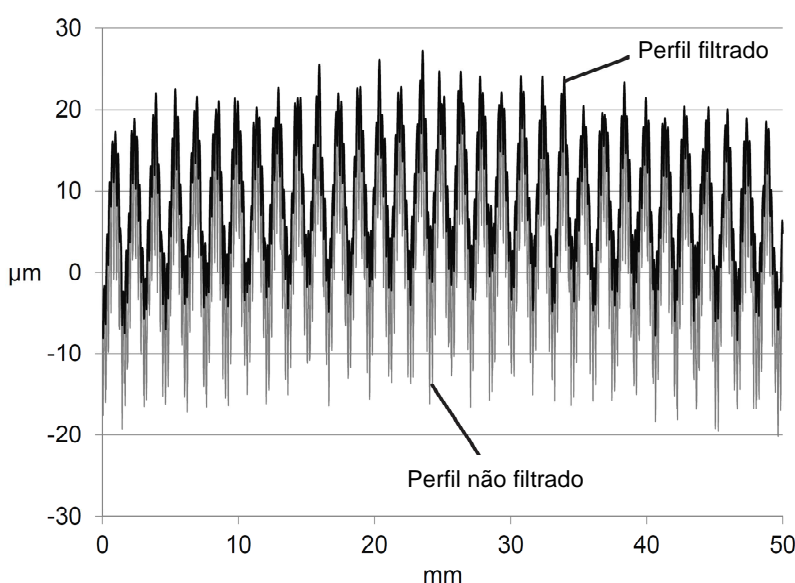


Figura 7.140 – Perfil de superfície filtrado com um filtro morfológico de disco de fecho – 2º exemplo (ISO/DIS 1101)

O perfil filtrado resultante apresenta também uma altura total com uma amplitude de cerca de 35  $\mu\text{m}$ . Logo, o filtro de disco de fecho de raio  $r = 0,5 \text{ mm}$  não permite fazer uma distinção entre os dois perfis originais em análise. A utilização de um disco de fecho com um raio maior, como elemento estruturante, permitiria mostrar a diferença existente. Por conseguinte, esse novo disco com um raio maior será apropriado, se a função depender da localização dos picos e o perfil da figura 7.134 não for considerado aceitável, ao mesmo tempo que o perfil da figura 7.138 possa ser julgado adequado, desde que os picos estejam na posição correta.

A figura 7.141 apresenta o perfil resultante da aplicação de um filtro envolvente ("hull"), ao perfil original da figura 7.138.

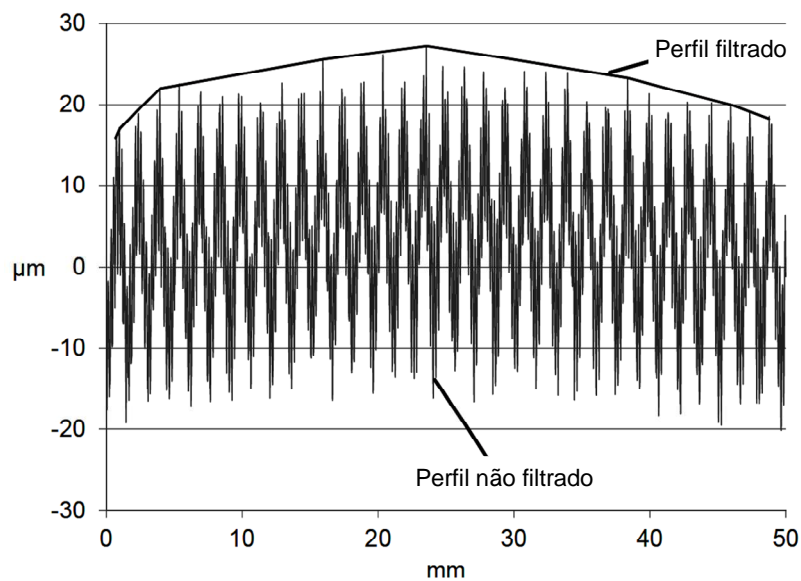
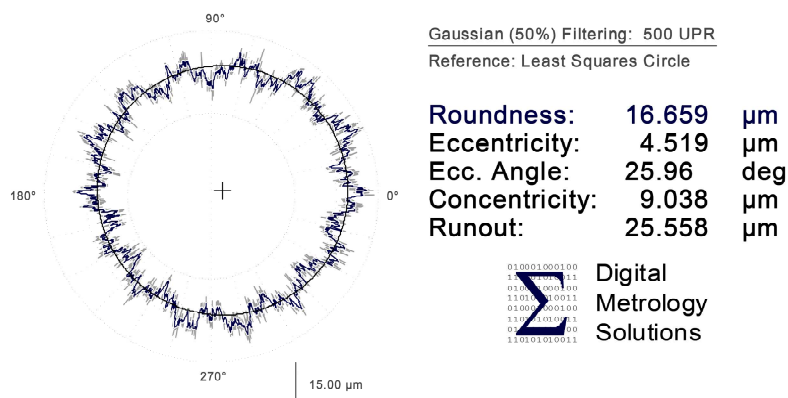


Figura 7.141 – Perfil de superfície filtrado com um filtro envolvente convexa (“convex hull”) – 2º exemplo (ISO/DIS 1101)

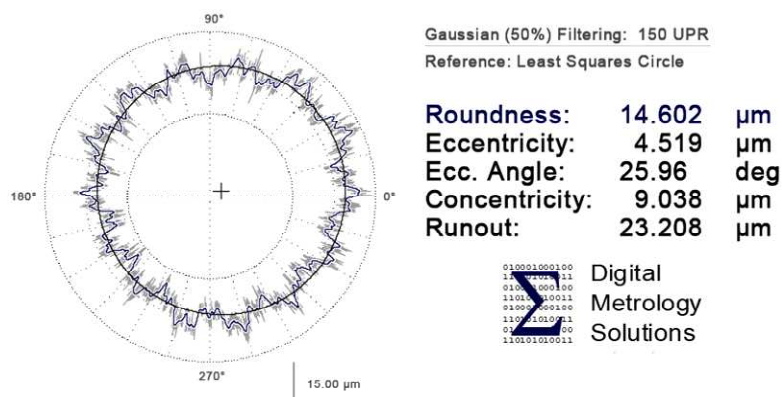
Neste caso, o perfil filtrado resultante apresenta uma altura total com uma amplitude de cerca de 10  $\mu\text{m}$ , verificando-se assim que o filtro envolvente convexa (“convex hull”) permite fazer uma distinção entre os dois perfis em comparação. Por conseguinte, este tipo de filtro será adequado se a função depender da localização dos picos e o perfil da figura 7.134 não for julgado aceitável, ao mesmo tempo que o perfil da figura 7.138 possa ser considerado apropriado, desde que os picos estejam na posição correta. Neste caso particular, o filtro envolvente permite fazer uma distinção melhor entre os dois perfis, do que a efetuada por meio de um filtro morfológico de disco de fecho.

Finalmente, no exemplo da figura 7.142, pode observar-se o efeito resultante da utilização de filtros de perfil gaussianos (FPLG) passa-baixo (ISO 16610-21), com diferentes índices de imbricação (“nesting indices”), expressos em termos de ondulações por rotação (UPR), na verificação de desvios geométricos numa peça de revolução [N2]. Tomando como exemplo, a avaliação dos desvios de circularidade (“roundness”), atente-se nas possíveis consequências resultantes da não indicação dos componentes da filtragem, na especificação geométrica do produto.

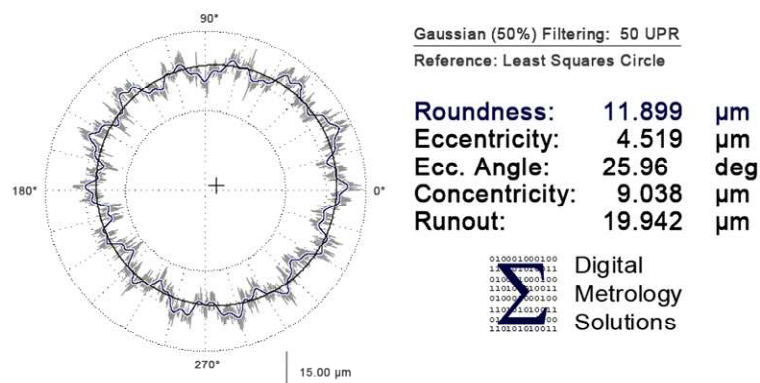
Admita-se que, na fase de prototipagem da peça de revolução, o desvio de circularidade de um protótipo, que satisfaz a função prevista, foi avaliado com um filtro de 15 UPR, tendo-se registado um desvio com o valor de 7,119  $\mu\text{m}$ . Considere-se também que esta verificação deu origem a que a respetiva tolerância de circularidade tenha sido fixada, na documentação técnica do produto, com um valor de  $t_{\text{O}} = 0,008 \text{ mm}$ , mas sem a indicação de quaisquer componentes de filtragem. Se, durante o processo produtivo, as peças fossem verificadas com um filtro de 150 UPR, obter-se-iam valores mais elevados e todos os exemplares com desvios de circularidade acima de 0,008 mm seriam rejeitados, apesar de muitos deles terem sido fabricados adequadamente, uma vez que peças com uma qualidade idêntica à do protótipo apresentariam agora valores à volta de 14,602  $\mu\text{m}$ .



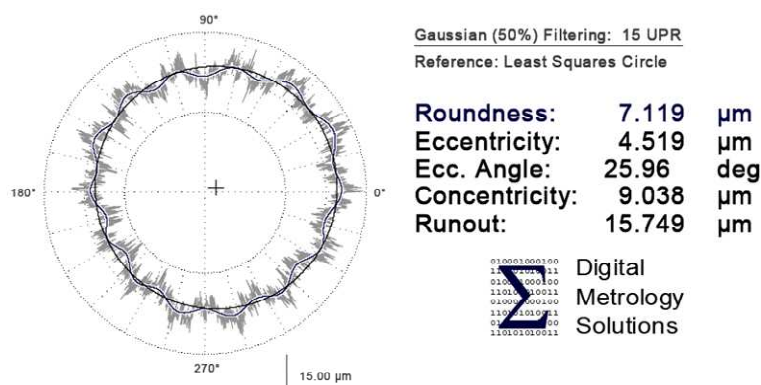
a) Filtragem com um valor de frequência de corte de 500 UPR



b) Filtragem com um valor de frequência de corte de 150 UPR



c) Filtragem com um valor de frequência de corte de 50 UPR



d) Filtragem com um valor de frequência de corte de 15 UPR

Figura 7.142 – Verificação de desvios geométricos numa peça de revolução, utilizando filtros gaussianos, passa-baixo, com diferentes valores da frequência de corte (UPR) [N2]



No caso oposto, considere-se que, na fase de prototipagem da peça de revolução, o desvio de circularidade do mesmo protótipo que acabou por satisfazer a função prevista foi antes avaliado com um filtro de 150 UPR, tendo-se registado um desvio com o valor de  $14,602 \mu\text{m}$ . Admita-se também que esta verificação deu origem a que a respetiva tolerância de circularidade tenha sido fixada, na documentação técnica do produto, com um valor de  $t_O = 0,015 \text{ mm}$ , mas sem a indicação de quaisquer componentes de filtragem. Se, durante o processo produtivo, as peças fossem agora verificadas com um filtro de 15 UPR, obter-se-iam valores muito mais baixos. Todos os exemplares com desvios de circularidade acima de  $0,015 \text{ mm}$  seriam rejeitados, mas muitos não conformes com a especificação seriam aceites, uma vez que peças com uma qualidade idêntica à do protótipo apresentariam, neste caso, valores à volta de  $7,119 \mu\text{m}$ .

Os resultados registados, neste exemplo de verificação, confirmam o facto de que, por via de uma escolha aleatória dos métodos e do equipamento de medição, os metrologistas acabam, involuntariamente, por estabelecer as características funcionais da peça ou então a função desta é decidida através do software integrado no equipamento de medição.

## 7.9.4 Associação

### 7.9.4.1 Generalidades

A **associação** (“*association*”), designada por “*fitting*” na literatura norte-americana, é uma operação para elementos geométricos utilizada para ajustar elemento(s) ideal(ais) [**elemento(s) de referência**] a elemento(s) não ideal(ais) [extraído(s) e filtrado(s)], em conformidade com um critério específico (ver secção 4.6.4).

A operação de associação é geralmente utilizada para dois fins distintos: o estabelecimento de referências especificadas (ver secção 7.8.4.3) e a avaliação de desvios geométricos (ver figura 7.143). Tradicionalmente esta operação era efetuada com o auxílio de planos de traçagem e controlo, mandris, dispositivos de medição especiais, etc. (ver exemplo na figura 7.5). No entanto, uma vez que a metrologia digital computadorizada se tornou o meio de referência, a nível industrial, para a verificação dimensional e geométrica de produtos, nomeadamente através da utilização de máquinas de medição de coordenadas (CMM) e de equipamento de varrimento laser, a operação de associação passou a ser abordada como um problema de otimização, com ou sem restrições, resolvido através de métodos numéricos [N1, S5, Z1].

Na figura 7.143, estão representados vários tipos de **elementos de referência** (“*reference features*”), ajustados a perfis de retitude e de circularidade e a superfícies de planeza e de cilindridade, relativamente aos quais devem ser referidos os desvios geométricos de forma e os parâmetros de avaliação correspondentes.

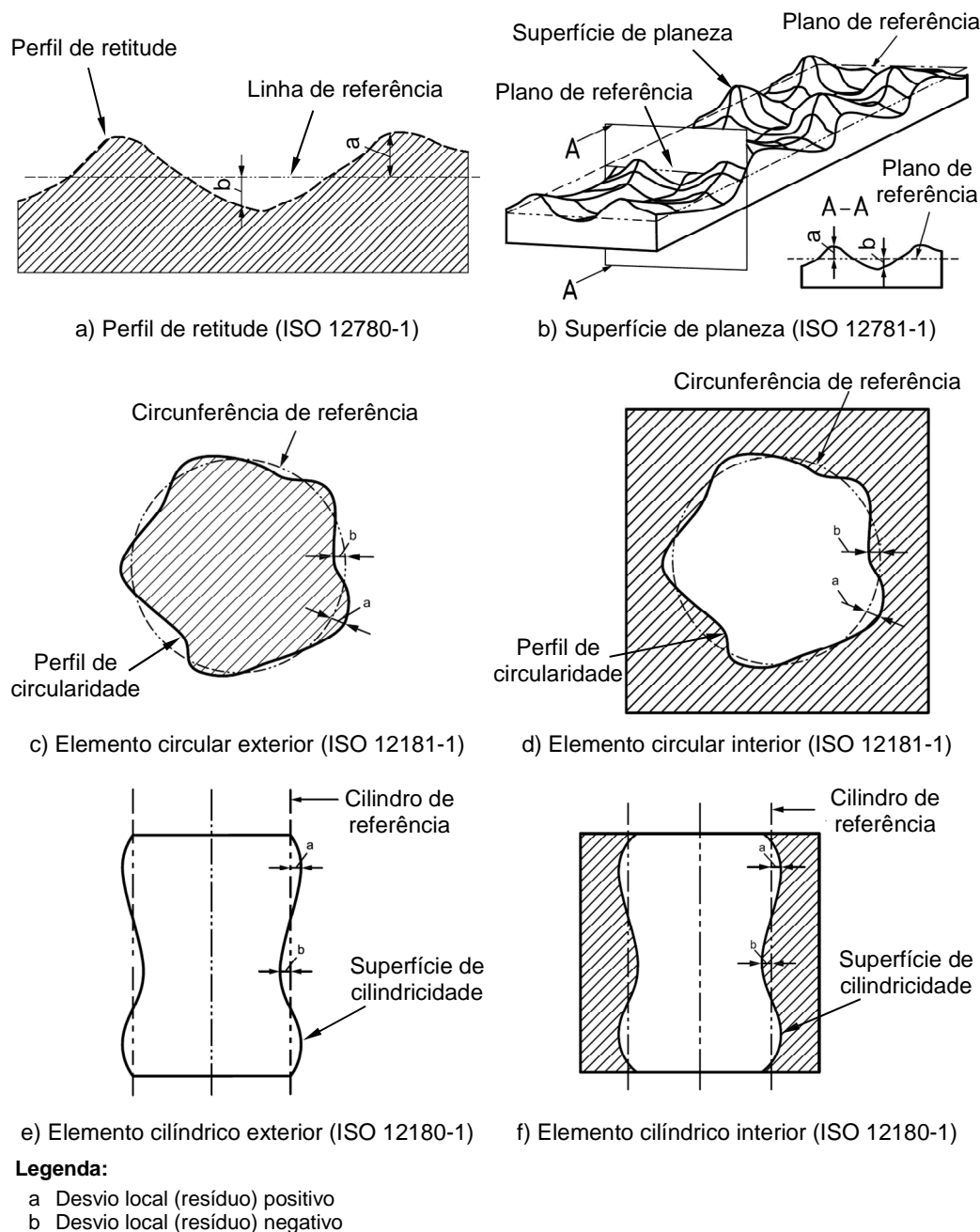


Figura 7.143 – Exemplos de elementos de referência ajustados aos elementos geométricos extraídos e filtrados

Os perfis de retitude e de circularidade e as superfícies de planeza e de cilindridade, indicados nos exemplos da figura 7.143, são elementos geométricos (integrais) extraídos que foram sujeitos a uma modificação através de uma operação de filtragem, relativamente aos quais podem ser aplicados os conceitos e os parâmetros de avaliação respeitantes aos desvios geométricos de forma.

Por convenção, o desvio de um ponto num perfil de retitude, em relação à linha de referência, ou de um ponto numa superfície de planeza, em relação ao plano de referência, é positivo se, a partir do elemento de referência, esse ponto se situar no sentido oposto à matéria. Por sua vez, o desvio de um ponto no perfil de circularidade de um elemento circular, em relação à circunferência de referência, ou de um ponto na superfície de cilindridade de um elemento cilíndrico, em relação ao

cilindro de referência, é positivo se, a partir do elemento de referência, esse ponto se situar num sentido oposto ao centro ou eixo desse elemento. Estes desvios devem ser contabilizados segundo a direção normal ao respetivo elemento de referência.

Existem vários métodos para efetuar a associação dos elementos de referência aos diferentes elementos geométricos extraídos e filtrados. Os métodos de associação podem ser definidos como problemas de otimização em que um critério (função objetivo, com ou sem restrições) descreve as condições que devem ser pesquisadas e satisfeitas para ajustar elementos ideais a elementos não ideais (ver figura 7.144). Neste tipo de problemas, devem determinar-se os parâmetros caracterizadores do elemento de referência (p. ex. o declive e a ordenada na origem de uma reta) que otimizam um objetivo de associação específico para um conjunto de pontos [H2, G3].

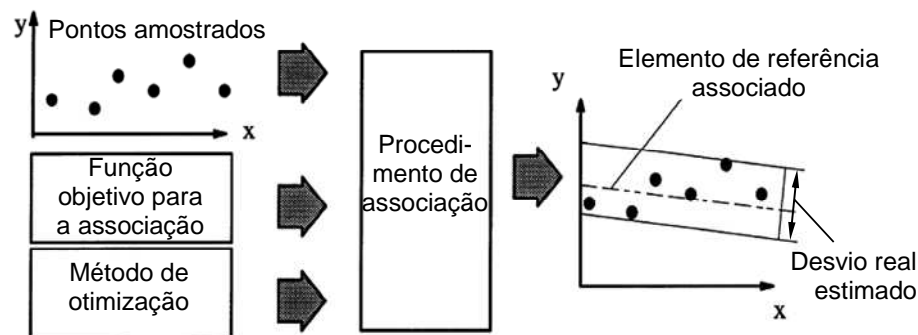


Figura 7.144 – Avaliação de desvios geométricos de forma. Adaptada de [N1]

As normas ISO 12780, ISO 12781, ISO 12181 e ISO 12180 estabelecem os métodos de associação dos elementos de referência que podem ser utilizados na avaliação de desvios geométricos de forma. O atual projeto de revisão da norma ISO 1101 especifica que o método de associação, por omissão, é o método minimax (Chebyshev), sem a consideração de quaisquer restrições (também designado por método da zona mínima), mas admite a possibilidade de se optar pela especificação de outro método, na documentação técnica de produtos. Uma escolha adequada de um desses métodos depende do objetivo da associação [Z1].

#### 7.9.4.2 Definições matemáticas de funções objetivo para a associação

As funções objetivo (para a associação) são fórmulas que descrevem a qualidade da associação, sendo definidas para conjuntos infinitos de pontos representativos de superfícies ideais e não ideais.

Um critério de associação é uma função objetivo, com ou sem restrições, definida para uma associação, podendo recorrer-se a diferentes critérios para especificar o ajuste considerado mais adequado. Os resultados dessa associação (os **elementos de referência**) poderão ser diferentes, dependendo da escolha do critério de associação.

Definido o vetor desvio,  $\vec{r}$ , como o vetor de todos os desvios (resíduos) dos  $n$  pontos amostrados, em relação ao elemento de referência, isto é,  $\vec{r} = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ , muitos critérios de associação podem ser expressos como sendo casos particulares de um critério geral designado por estimador da norma  $L_p$  do vetor desvio [H2, G3, W1]. Este problema consiste na determinação dos parâmetros de associação (caracterizadores do elemento de referência, representado por um vetor de forma  $\vec{b}$ ) que minimizam a norma  $L_p$ , definida matematicamente através da expressão:

$$\text{norma } L_p = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (7.5)$$

em que:

- $i$  – é o índice de um ponto particular amostrado no elemento não ideal;
- $r_i$  – é o resíduo correspondente à distância normal entre um ponto de um elemento não ideal e o correspondente ponto no seu elemento ideal associado (elemento de referência), ver figura 7.145;
- $p$  – é a ordem da função, com  $0 < p \leq \infty$ ;
- $n$  – é o número de pontos extraídos no(s) elemento(s) não ideal(ais).

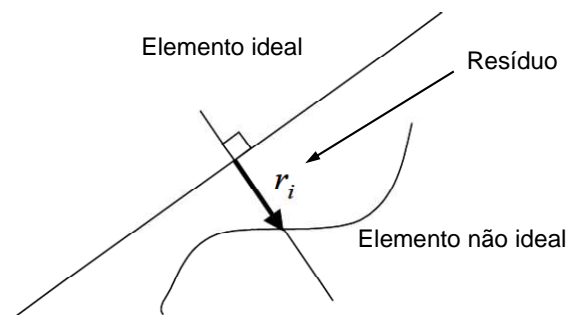


Figura 7.145 – Representação de um resíduo. Adaptada do ISO/CD 5459-3

Uma vez que o valor  $n$  é uma constante,  $1/n$  pode ser geralmente omitido na expressão (7.5), para a maioria das aplicações de associação de superfícies. Analogamente, uma vez que  $p$  é também fixo, o expoente  $1/p$  é frequentemente omitido, dando origem à seguinte função objetivo [F2, Z1]:

$$S_p = \sum_{i=1}^n |r_i|^p \quad (7.6)$$

A função  $S_p$  e a norma  $L_p$  representam o mesmo problema.

As funções objetivo da soma mínima das distâncias, dos mínimos quadrados totais, da zona mínima (ou minimax) e minimax (Chebyshev) com a restrição de ser exterior à matéria são definidas através da norma  $L_p$ . As funções objetivo do máximo inscrito e do mínimo circunscrito são um pouco diferentes das funções minimax (Chebyshev) com a restrição de ser exterior à matéria, mas os resultados da associação parecem muitas vezes semelhantes.

#### 7.9.4.2.1 Soma mínima das distâncias

A finalidade da função objetivo da soma mínima das distâncias absolutas (“*least-sum-of-distances*”) é a minimização do caso especial da norma  $L_p$ , com  $p = 1$ :

$$\text{MIN [norma } L_1] = \text{MIN} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i| \right] = \text{MIN} [S_1] = \text{MIN} \left[ \sum_{i=1}^n |r_i| \right] \quad (7.7)$$

O objetivo desta associação é a minimização da soma dos valores absolutos dos resíduos,  $r_i$ , o que é uma generalização da determinação da mediana da distribuição desses resíduos, pela qual passa o elemento de referência resultante. Esta associação é menos sensível aos valores amostrados atípicos (“*outliers*”) do que a associação dos mínimos quadrados totais [F2, Z1].

Um plano associado de acordo com esta função objetivo, com a restrição de todos os pontos amostrados ficarem de um dos lados do plano, está em conformidade com a norma ASME Y14.5:2009 para o estabelecimento de uma referência especificada primária plana, porque assegura um plano estável que contacta, pelo menos, três dos pontos amostrados [S5, S6].

#### 7.9.4.2.2 Mínimos quadrados totais

A finalidade da função objetivo dos mínimos quadrados totais (“*total least-squares*”) ou gaussiana é a minimização da soma dos quadrados dos valores dos resíduos,  $r_i$ . Corresponde à minimização do caso especial da norma  $L_p$ , com  $p = 2$ :

$$\text{MIN [norma } L_2] = \text{MIN} \left[ \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right] = \text{MIN} [S_2] = \text{MIN} \left[ \sum_{i=1}^n |r_i|^2 \right] \quad (7.8)$$

Atualmente, é a aproximação mais utilizada na análise de dados obtidos através de máquinas de medição por coordenadas, ao nível da indústria [S6]. No entanto, tem tendência a sobrestimar os valores dos desvios geométricos, o que pode dar origem à rejeição de peças boas [N1]. O elemento de referência associado passa pela média amostral de uma distribuição normal dos resíduos,  $r_i$ . Esta associação é mais sensível aos valores amostrados atípicos do que a associação da soma mínima das distâncias [F2, Z1].

Shakarji e Srinivasan [S2] apresentaram um conjunto de algoritmos numéricos para o ajustamento de elementos associados (linhas, planos e planos paralelos) aos correspondentes elementos extraídos, segundo o critério dos mínimos quadrados totais (distâncias ortogonais). Mostraram também que, em casos de distribuições não uniformes dos pontos amostrados, proporcionadas por algumas das novas tecnologias de medição, é importante a consideração de “pesos” que tenham em conta as magnitudes das zonas de influência dos vários pontos.

### 7.9.4.2.3 Zona mínima

A finalidade da função objetivo da zona mínima ou minimax (Chebyshev) (“*minimum zone*” ou “*two-sided minimax*”) é a minimização do caso especial da norma  $L_p$ , com  $p = \infty$ :

$$\text{MIN [norma } L_\infty] = \text{MIN} \left[ \left[ \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \right]_{p \rightarrow \infty} \right] \quad (7.9)$$

O limite de  $L_p$ , quando  $p$  tende para  $\infty$ , é o resíduo de magnitude máxima [H2, S5, S6], de modo que a função objetivo da zona mínima ou minimax (Chebyshev) minimiza o valor máximo dos valores absolutos de resíduos:

$$\text{MIN [norma } L_\infty] = \text{MIN}_{\vec{b}} \left( \text{MAX}_{1 \leq i \leq n} |r_i| \right) \quad (7.10)$$

Esta minimização permite obter o elemento de referência da zona mínima ou minimax (Chebyshev). A amplitude desta zona é a diferença entre os resíduos máximo e mínimo,

$$\text{MZ} \equiv \left( \text{MAX}_{1 \leq i \leq n} r_i - \text{MIN}_{1 \leq i \leq n} r_i \right) = \left| \text{MAX}_{1 \leq i \leq n} r_i \right| + \left| \text{MIN}_{1 \leq i \leq n} r_i \right| \quad (7.11)$$

Na igualdade da expressão anterior, os resíduos podem ter valores positivos e negativos. A associação resultante é fortemente afetada pela existência de valores amostrados atípicos, sendo útil para estimar desvios de forma [F2, Z1].

Atualmente, de acordo com o projeto de norma ISO/DIS 1101.2, o critério da zona mínima ou minimax (Chebyshev) sem quaisquer restrições é o critério normalizado, por omissão, para as operações de associação utilizadas na especificação de características geométricas de forma. A preferência por este método tem razões históricas que se prendem com o facto de ser relativamente fácil medir a amplitude (“*range*”) da zona, por intermédio de um comparador [S5].

### 7.9.4.2.4 Minimax (Chebyshev) com a restrição de ser exterior à matéria

A finalidade da função objetivo minimax (Chebyshev) com a restrição de ser exterior à matéria (“*One-sided Chebyshev*”) é a minimização do caso especial da norma  $L_p$ , com  $p = \infty$  e todos os resíduos,  $r_i$ , positivos ou negativos, consoante o lado considerado do elemento geométrico.

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall i, \quad r_i \geq 0 \quad \text{ou} \quad r_i \leq 0 \\ \text{MIN [norma } L_\infty] = \text{MIN} \left[ \left[ \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \right]_{p \rightarrow \infty} \right] \end{array} \right. \quad (7.12)$$

O limite de  $L_p$ , quando  $p$  tende para  $\infty$ , é o resíduo de magnitude máxima [H2, S5, S6], de modo que a função objetivo “*One-sided Chebyshev*” minimiza o valor máximo de resíduos sujeitos à restrição de serem todos positivos ou todos negativos:

$$\text{MIN [norma } L_\infty] = \text{MIN}_{\vec{b}} \left( \text{MAX}_{1 \leq i \leq n} |r_i| \right) \quad (7.13)$$

com  $r_i \geq 0$  ou  $r_i \leq 0$ .

A associação resultante é também fortemente afetada pela existência de valores amostrados atípicos. Esta função objetivo é, atualmente, o critério de associação ISO, por omissão, para elementos simples que não sejam elementos de tamanho ou para elementos de tamanho com características intrínsecas fixas, ver ISO 5459:2011, a referência [S6] e a secção 7.8.4.3 deste texto.

#### 7.9.4.2.5 Máximo inscrito

A finalidade da função objetivo do máximo inscrito (“*maximum inscribed*”) é a maximização da(s) característica(s) intrínseca(s) de um elemento ideal, com todos os resíduos positivos, definida em termos matemáticos como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall i, \quad r_i \geq 0, \quad \text{com } i = 1, \dots, n \\ \text{MAX } R \\ \vec{c} \end{array} \right. \quad (7.14)$$

em que  $\vec{c}$  é o vetor dos parâmetros do elemento associado a maximizar, que pode ser o centro de um círculo ou de uma esfera ou o eixo de um cilindro e  $R$  é o raio correspondente [F2, Z1].

No exemplo de aplicação da figura 7.146, pode observar-se a diferença entre a circunferência inscrita máxima, determinada através da expressão (7.14) e a circunferência associada pelo critério minimax com a restrição de ser exterior à matéria ( $r_i \geq 0$ ), obtida a partir da expressão (7.13).

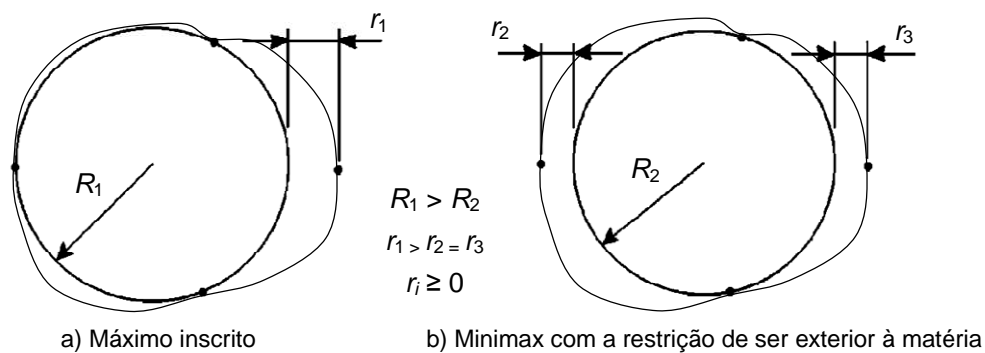


Figura 7.146 – Comparação entre circunferências inscritas associadas através de diferentes critérios. Adaptada de [Z1]

O raio da circunferência inscrita pelo critério minimax é mais pequeno do que o raio da maior circunferência inscrita. A função objetivo do máximo inscrito utiliza-se apenas em geometrias fechadas [M4].

#### 7.9.4.2.6 Mínimo circunscrito

A finalidade da função objetivo do mínimo circunscrito ("*minimum circumscribed*") é a minimização da(s) característica(s) intrínseca(s) de um elemento ideal, com todos os resíduos negativos, definida em termos matemáticos como:

$$\begin{cases} \forall i, & r_i \leq 0, \text{ com } i = 1, \dots, n \\ \text{MIN } R \\ \bar{c} \end{cases} \quad (7.15)$$

em que  $\bar{c}$  é o vetor dos parâmetros do elemento associado a minimizar, que pode ser o centro de um círculo ou de uma esfera ou o eixo de um cilindro e  $R$  é o raio correspondente [F2, Z1].

No exemplo de aplicação da figura 7.147, pode observar-se a diferença entre a circunferência inscrita máxima, determinada através da expressão (7.15) e a circunferência associada pelo critério minimax com a restrição de ser exterior à matéria ( $r_i \leq 0$ ), obtida a partir da expressão (7.13).

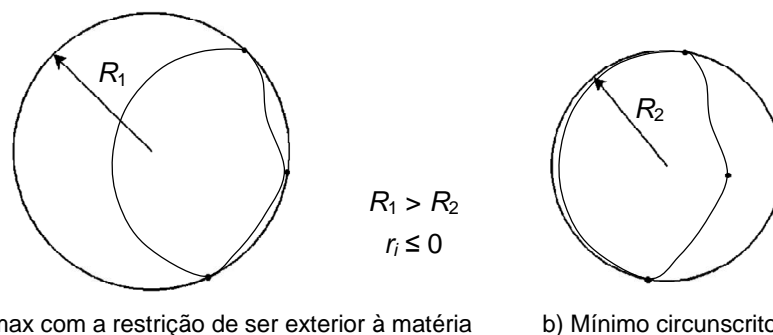


Figura 7.147 – Comparação entre circunferências circunscritas associadas através de diferentes critérios. Adaptada de [Z1]



O raio da circunferência circunscrita pelo critério minimax é maior do que o raio da menor circunferência circunscrita. A função objetivo do mínimo circunscrito utiliza-se apenas em geometrias fechadas [M4].

A determinação do cilindro mínimo circunscrito que envolve um conjunto de pontos no espaço, com vista à obtenção de alguma informação quantitativa sobre o modo como uma peça se deverá ajustar num conjunto, é um exemplo de aplicação desta função objetivo. No entanto, deve também assinalar-se que este singelo enunciado do problema não é de fácil resolução através de métodos computacionais [S5].

#### 7.9.4.3 Breves referências aos algoritmos para o cálculo de funções objetivo

O desvio de forma de um elemento geométrico é uma função do vetor desvio,  $\vec{r}$ . Em geral, o procedimento para estimar um desvio geométrico de forma desenrola-se em três etapas [G3]:

- 1) Determinação dos valores dos parâmetros caracterizadores do elemento de referência considerado, que minimizam uma função pré-definida dos desvios (resíduos), p. ex. a norma  $L_p$ , por meio de um algoritmo baseado nas coordenadas dos  $n$  pontos amostrados do elemento geométrico a verificar,  $(x_i, y_i)$  ou  $(x_i, y_i, z_i)$ , com  $i = 1, 2, \dots, n$ .
- 2) Utilização dos parâmetros caracterizadores do elemento de referência para calcular os desvios (resíduos).
- 3) Determinação da diferença entre os resíduos máximo e mínimo, isto é a amplitude da zona do vetor desvio,  $\vec{r}$ , que corresponde ao desvio de forma do elemento geométrico.

As magnitudes relativas das diferentes normas do vetor desvio (vetor de todos os resíduos dos  $n$  pontos amostrados, em relação ao elemento de referência) podem ser expressas através da relação seguinte:

$$\text{norma } L_1 \geq \text{norma } L_2 \geq \text{norma } L_\infty \quad (7.16)$$

Gosavi e Cudney [G3] forneceram uma visão geral das técnicas de análise de desvios de forma apresentadas na literatura da especialidade, apontando as suas vantagens e inconvenientes e dividindo-as em dois grandes grupos: métodos algébricos e métodos de geometria computacional.

Em trabalhos publicados por Feng e Hopp [F2] e Zhao et al. [Z1] indicam-se várias referências com uma abordagem mais desenvolvida de diferentes algoritmos de associação, a maioria dos quais baseada na norma  $L_p$ . Pode também encontrar-se uma breve revisão dos algoritmos para o cálculo das zonas mínimas de tolerâncias geométricas de forma, a maioria dos quais desenvolvidos para duas dimensões.

## 7.10 Exemplos de indicações e definições de tolerâncias geométricas

Nas figuras seguintes, adaptadas do ISO/DIS 1101.2:2015, apresentam-se alguns exemplos de base das diferentes tolerâncias geométricas, em que os vários requisitos são definidos apenas através de zonas de tolerância simples, de um modo explícito e direto. As representações em vistas axonométricas 3D ilustram o modo como uma dada especificação pode ser completamente indicada através de uma anotação visível. Estes exemplos de indicações de tolerâncias geométricas contemplam casos de tolerâncias de forma (ver figura 7.148), de perfil (ver figura 7.149), de orientação (ver figura 7.150), de posição (ver figura 7.151) e de batimento (ver figura 7.152).

Complementarmente, a norma ISO 16792 apresenta uma alternativa para as indicações indiretas, contemplando as possibilidades da ligação de especificações a modelos em CAD 3D. Deste modo, diferentes componentes da especificação poderão ficar disponíveis, através de uma função de consulta ou de outra interrogação de dados no modelo, em vez de serem indicados por meio de anotações visíveis, mas no entanto sem a capacidade de efetuar qualquer modificação da especificação geométrica.

As possibilidades, abertas pela nova linguagem GPS, de definir especificações geométricas através de conjuntos ordenados de operações (**operadores**) de especificação especiais, para as tolerâncias geométricas (de forma, de orientação, de posição) e para as referências especificadas e sistemas de referências especificadas, que podem ser considerados como instruções virtuais de medição, em que cada operação e os seus parâmetros definidores são passos do processo de medição, permitindo, por exemplo, a inclusão de operações de filtragem e de associação, foi já apresentada detalhadamente ao longo deste capítulo.


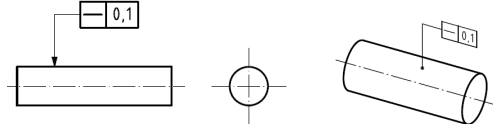
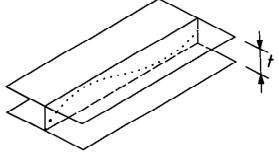
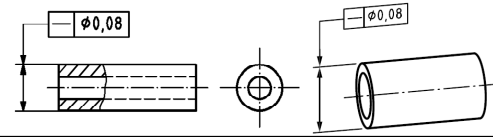
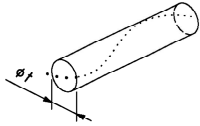

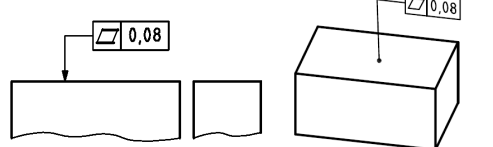
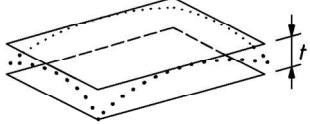

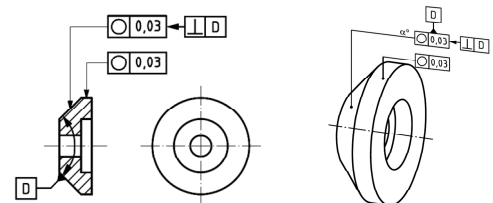
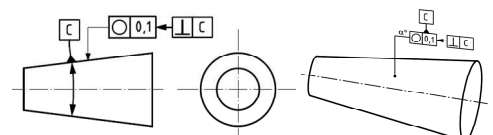
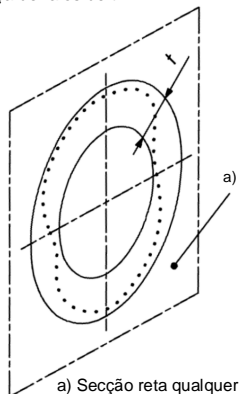

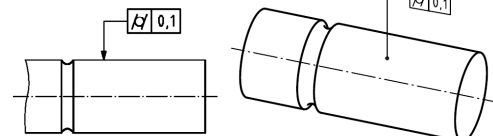
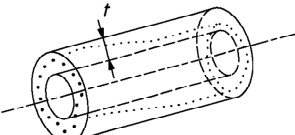
Indicação e interpretação em 2D em 3D	Definição da zona de tolerância
<b>Tolerância de retitude</b> (símbolo  )	
<p>Uma linha geratriz extraída qualquer na superfície cilíndrica deve estar contida entre dois planos paralelos e distantes, entre si, de 0,1 mm.</p> <p>Nota: A definição de uma linha geratriz extraída não está ainda normalizada.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por dois planos paralelos, distantes entre si de <math>t</math>.</p> 
<p>A linha mediana extraída do cilindro ao qual se aplica a tolerância deve estar contida numa zona cilíndrica de 0,08 mm de diâmetro.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por um cilindro de diâmetro <math>t</math>, se o valor da tolerância for precedido do símbolo <math>\varnothing</math>.</p> 
<b>Tolerância de planeza</b> (símbolo  )	
<p>A superfície extraída deve estar contida entre dois planos paralelos distantes, entre si, de 0,08 mm.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por dois planos paralelos, distantes entre si de <math>t</math>.</p> 
<b>Tolerância de circularidade</b> (símbolo  )	
<p>A linha circular extraída, numa secção reta qualquer das superfícies cilíndricas e cónicas, deve estar contida entre duas circunferências coplanares concêntricas, com uma diferença de raios de 0,03 mm.</p>  <p>A linha circular extraída (real), numa secção reta qualquer da superfície cónica, deve estar contida entre duas circunferências coplanares concêntricas, com uma diferença de raios de 0,1 mm.</p>  <p>Deve ser sempre utilizado um <b>indicador do elemento de direção</b>, em superfícies de revolução que não são cilíndricas nem esféricas, para indicar a direção da largura da zona de tolerância da circularidade perpendicular à superfície ou, neste caso, fazendo um ângulo definido (90°) com o eixo do elemento toleranciado.</p>	<p>A zona de tolerância, na secção reta considerada, está limitada por duas circunferências concêntricas com uma diferença de raios de <math>t</math>.</p>  <p>a) Secção reta qualquer</p> <p>Nota: A definição de uma linha circular extraída não está ainda normalizada</p>
<b>Tolerância de cilíndricidade</b> (símbolo  )	
<p>A superfície cilíndrica extraída deve estar contida entre dois cilindros coaxiais, com uma diferença nos raios de 0,1 mm.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por dois cilindros coaxiais com uma diferença de raios de <math>t</math>.</p> 

Figura 7.148 – Exemplos de indicações de tolerâncias geométricas de forma (ISO 1101)

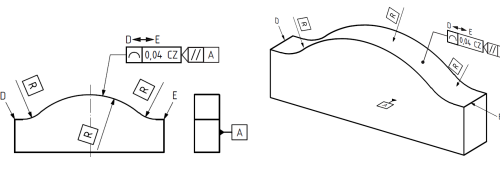
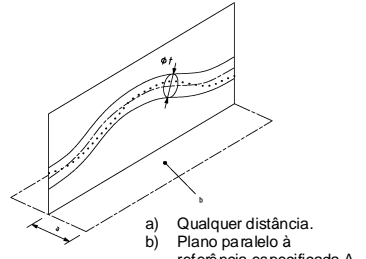
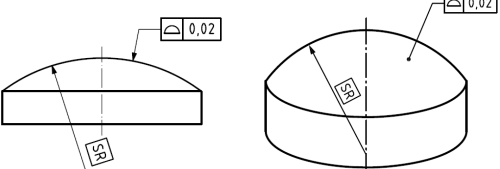
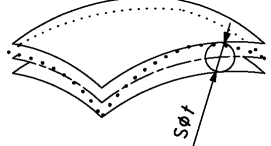
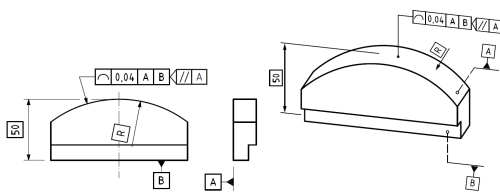
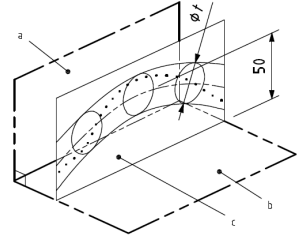
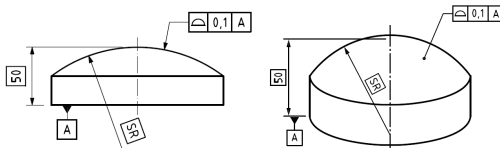
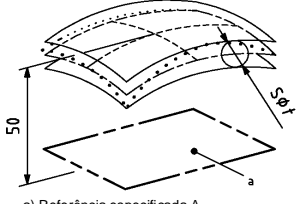
Indicação e interpretação em 2D em 3D	Definição da zona de tolerância
<b>Tolerâncias de forma</b>	
<b>Tolerância de perfil de uma linha</b> (símbolo $\frown$ )	
<p>Em cada secção, paralela ao plano de projeção A, conforme especificado pelo indicador do plano de interseção, a linha de perfil extraída deve estar contida entre duas linhas equidistantes envolvendo os círculos de diâmetro 0,04 mm, cujos centros estão situados sobre uma linha com a forma geométrica teoricamente exata.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por duas linhas envolventes dos círculos de diâmetro <math>t</math>, cujos centros estão situados sobre uma linha com a forma geométrica teoricamente exata.</p>  <p>a) Qualquer distância. b) Plano paralelo à referência especificada A.</p>
<b>Tolerância de perfil de uma superfície</b> (símbolo $\bigcap$ )	
<p>A superfície extraída deve estar contida entre duas superfícies equidistantes envolvendo esferas de diâmetro 0,02 mm, cujos centros estão situados sobre uma superfície com a forma geométrica teoricamente exata.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por duas superfícies envolventes das esferas de diâmetro <math>t</math>, cujos centros estão situados sobre uma superfície com a forma geométrica teoricamente exata.</p>  <p>a) Qualquer distância.</p>
<b>Tolerâncias de situação (orientação e posição)</b>	
<b>Tolerância de perfil de uma linha</b> (símbolo $\frown$ )	
<p>Em cada secção, paralela ao plano de referência A, conforme especificado pelo indicador do plano de interseção, a linha de perfil extraída deve estar contida entre duas linhas equidistantes envolvendo os círculos de diâmetro 0,04 mm, cujos centros estão situados sobre uma linha com a forma geométrica teoricamente exata em relação ao plano de referência A e ao plano de referência B.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por duas linhas envolventes dos círculos de diâmetro <math>t</math>, cujos centros estão situados sobre uma linha com uma forma geométrica teoricamente exata, em relação ao plano de referência A e ao plano de referência B.</p>  <p>a) Referência especificada A. b) Referência especificada B. c) Plano paralelo à referência especificada A.</p>
<b>Tolerância de perfil de uma superfície</b> (símbolo $\bigcap$ )	
<p>A superfície extraída deve estar contida entre duas superfícies equidistantes envolvendo esferas de diâmetro 0,1 mm, cujos centros estão situados sobre uma superfície com a forma geométrica teoricamente exata, em relação ao plano de referência A.</p>  <p>Se a especificação for de orientação, deve inscrever-se o elemento <math>\gg</math> nos compartimentos adequados do indicador de tolerância, de modo a restringir apenas os graus de liberdade de orientação.</p>	<p>A zona de tolerância está limitada por duas superfícies envolventes das esferas de diâmetro <math>t</math>, cujos centros estão situados sobre uma superfície com a forma teoricamente exata, em relação ao plano de referência A.</p>  <p>a) Referência especificada A</p>

Figura 7.149 – Exemplos de indicações de tolerâncias geométricas de perfil (ISO 1101)

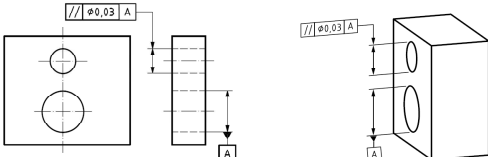
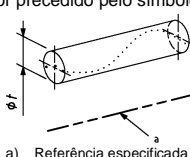
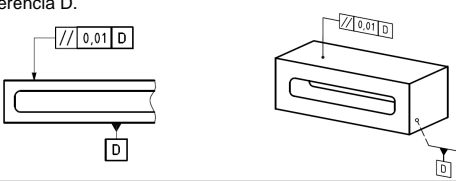
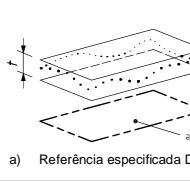
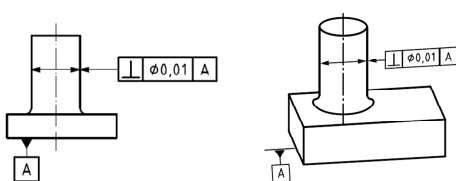
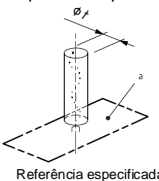
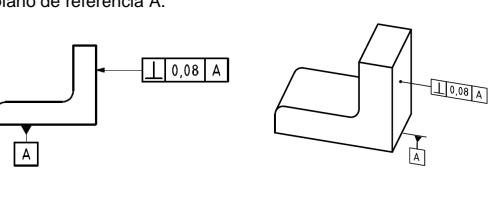
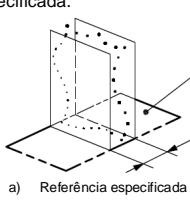
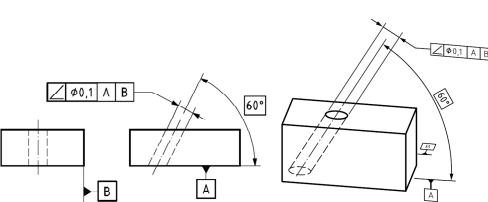
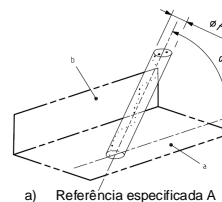
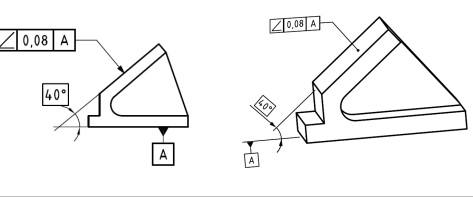
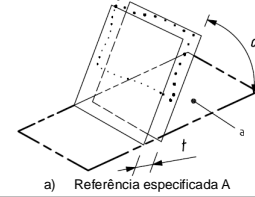
Indicação e interpretação em 2D em 3D	Definição da zona de tolerância
<b>Tolerância de paralelismo</b> (símbolo //)	
<p>A linha mediana extraída deve estar contida numa zona cilíndrica de diâmetro 0,03 mm, paralela ao eixo de referência A.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por um cilindro de diâmetro <math>t</math> paralelo à referência especificada, se o valor da tolerância for precedido pelo símbolo <math>\varnothing</math>.</p>  <p>a) Referência especificada A</p>
<p>A superfície extraída deve estar contida entre dois planos paralelos distantes, entre si, de 0,01 mm e paralelos ao plano de referência D.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por dois planos paralelos distantes, entre si, de <math>t</math> e paralelos ao plano de referência.</p>  <p>a) Referência especificada D</p>
<b>Tolerância de perpendicularidade</b> (símbolo $\perp$ )	
<p>A linha mediana extraída do cilindro deve estar contida numa zona cilíndrica de diâmetro 0,01 mm, perpendicular ao plano de referência A.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por um cilindro de diâmetro <math>t</math> perpendicular à referência especificada, se o valor da tolerância for precedido pelo símbolo <math>\varnothing</math>.</p>  <p>a) Referência especificada A</p>
<p>A superfície extraída deve estar contida entre dois planos paralelos distantes, entre si, de 0,08 mm e perpendiculares ao plano de referência A.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por dois planos paralelos distantes, entre si, de <math>t</math> e perpendiculares à referência especificada.</p>  <p>a) Referência especificada A</p>
<b>Tolerância de inclinação (angularidade)</b> (símbolo $\angle$ )	
<p>A linha mediana extraída deve estar contida numa zona de tolerância cilíndrica de diâmetro 0,1 mm, paralela ao plano de referência B e inclinada de um ângulo teoricamente exato de 60°, em relação ao plano de referência A.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por um cilindro de diâmetro <math>t</math>, se o valor da tolerância for precedido pelo símbolo <math>\varnothing</math>. A zona de tolerância cilíndrica é paralela ao plano de referência B, e inclinada de um ângulo especificado, em relação ao plano de referência A.</p>  <p>a) Referência especificada A b) Referência especificada B</p>
<p>A superfície extraída deve estar contida entre dois planos paralelos distantes, entre si, de 0,08 mm e inclinados de um ângulo teoricamente exato de 40°, em relação ao plano de referência A.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por dois planos paralelos distantes, entre si, de <math>t</math> e inclinados do ângulo especificado, em relação à referência especificada.</p>  <p>a) Referência especificada A</p>

Figura 7.150 – Exemplos de indicações de tolerâncias geométricas de orientação (ISO 1101)

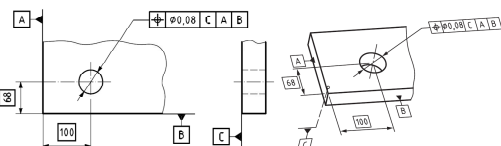
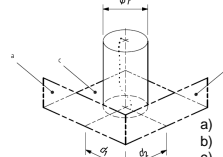
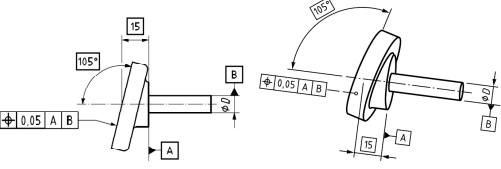
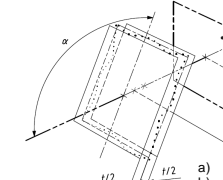
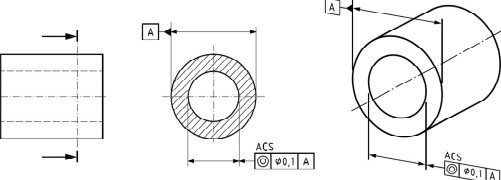
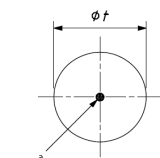
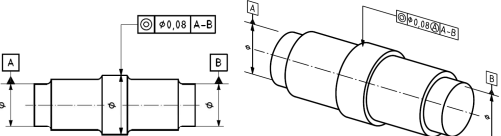
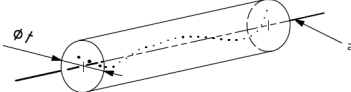
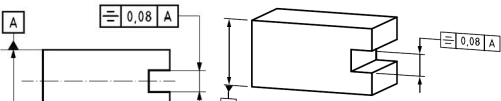
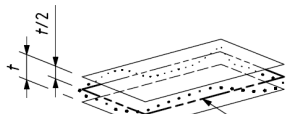
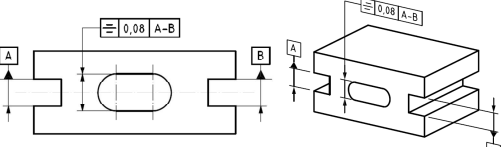
Indicação e interpretação em 2D em 3D	Definição da zona de tolerância
<b>Tolerância de localização</b> (símbolo $\oplus$ )	
<p>A linha mediana extraída do furo deve estar contida numa zona cilíndrica de diâmetro 0,08 mm, cujo eixo coincide com a posição teoricamente exata do furo considerado, em relação aos planos de referência C, A e B.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por um cilindro de diâmetro <math>t</math>, se o valor da tolerância for precedido pelo símbolo <math>\varnothing</math>. O eixo do cilindro de tolerância é fixado através de dimensões teoricamente exatas, em relação às referências especificadas C, A e B.</p>  <p>a) Referência especificada A b) Referência especificada B c) Referência especificada C</p>
<p>A superfície extraída deve estar contida entre dois planos paralelos distantes, entre si, de 0,05 mm e dispostos simetricamente de cada lado da posição teoricamente exata da superfície, em relação ao plano de referência A e ao eixo de referência B.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por dois planos paralelos distantes de <math>t</math> e dispostos simetricamente em relação à posição teoricamente exata, fixada através de dimensões teoricamente exatas, em relação às referências especificadas A e B.</p>  <p>a) Referência especificada A b) Referência especificada B</p>
<b>Tolerância de concentricidade e de coaxialidade</b> (símbolo $\odot$ )	
<p>O centro extraído da circunferência interior, em qualquer secção reta (ACS), deve estar contido numa circunferência de diâmetro 0,1 mm, centrada com o ponto de referência A, na mesma secção reta.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por uma circunferência de diâmetro <math>t</math>; o valor da tolerância deve ser precedido pelo símbolo <math>\varnothing</math>. O centro da zona de tolerância circular coincide com o ponto de referência.</p>  <p>a) Referência especificada A</p>
<p>A linha mediana extraída do cilindro toleranciado deve estar contida numa zona cilíndrica de diâmetro 0,08 mm, cujo eixo é a linha reta de referência comum A-B.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por um cilindro de diâmetro <math>t</math>; o valor da tolerância deve ser precedido pelo símbolo <math>\varnothing</math>. O eixo da zona de tolerância cilíndrica coincide com a referência especificada.</p>  <p>a) Referência especificada A</p>
<b>Tolerância de simetria</b> (símbolo $\equiv$ )	
<p>A superfície mediana extraída deve estar contida entre dois planos paralelos distantes, entre si, de 0,08 mm, que estão dispostos simetricamente em relação ao plano de referência A.</p> 	<p>A zona de tolerância está limitada por dois planos paralelos distantes, entre si, de <math>t</math> e dispostos simetricamente em relação ao plano mediano, relativo à referência especificada.</p>  <p>a) Referência especificada A</p>
<p>A superfície mediana extraída deve estar contida entre dois planos paralelos distantes, entre si, de 0,08 mm e dispostos simetricamente em relação ao plano de referência comum A-B.</p> 	

Figura 7.151 – Exemplos de indicações de tolerâncias geométricas de posição (ISO 1101)

Indicação e interpretação em 2D em 3D	Definição da zona de tolerância
<b>Tolerância de batimento circular</b> (símbolo $\nearrow$ )	
<b>Tolerância de batimento circular radial</b> A linha extraída, em qualquer secção reta, perpendicular à linha reta de referência comum A-B, deve estar contida entre duas circunferências concêntricas e coplanares, com uma diferença de raios de 0,1 mm.	
A zona de tolerância está limitada, em cada secção perpendicular ao eixo de referência, por duas circunferências concêntricas, com uma diferença de raios igual a $t$ , cujos centros coincidem com a referência especificada. 	
<b>Tolerância de batimento circular axial</b>	
A linha extraída, numa secção cilíndrica qualquer, cujo eixo coincide com o eixo de referência D, deve estar contida entre duas circunferências distantes, entre si, de 0,1 mm. Quando a linha geratriz do elemento toleranciado não é reta, o ângulo no vértice da secção cônica varia, em função da posição considerada.	
A zona de tolerância está limitada, em qualquer secção cilíndrica, por duas circunferências distantes, entre si, de $t$ , situadas na secção cilíndrica, cujo eixo coincide com a referência especificada. A largura da zona de tolerância está na direcção normal à geometria especificada, salvo indicação em contrário.	
<b>Tolerância de batimento circular numa direcção especificada</b>	
A linha extraída, numa secção cônica qualquer, cujo eixo coincide com o eixo de referência C, deve estar contida entre duas circunferências distantes, entre si, de 0,1 mm, dentro da secção cônica. Quando a linha geratriz do elemento toleranciado não é reta, o ângulo no vértice da secção cônica varia, em função da posição considerada.	
A zona de tolerância está limitada, em cada secção cônica, por duas circunferências distantes, entre si, de $t$ , cujos eixos coincidem com a referência especificada. A largura da zona de tolerância está na direcção normal à geometria especificada, salvo indicação em contrário.	
<b>Tolerância de batimento total</b> (símbolo $\nearrow$ )	
<b>Tolerância de batimento total radial</b>	
A superfície extraída deve estar contida entre dois cilindros coaxiais, com uma diferença de raios de 0,1 mm e os eixos coincidentes com a linha reta de referência comum A-B.	
A zona de tolerância está limitada por dois cilindros coaxiais com uma diferença de raios de $t$ , cujos eixos coincidem com a referência especificada.	
<b>Tolerância de batimento circular axial</b>	
A superfície extraída deve estar contida entre dois planos paralelos distantes, entre si, de 0,1 mm e perpendiculares ao eixo de referência D.	
A zona de tolerância está limitada por dois planos paralelos distantes, entre si, de $t$ , e perpendiculares à referência especificada.	
Uma tolerância de perpendicularidade teria o mesmo significado.	

Figura 7.152 – Exemplos de indicações de tolerâncias geométricas de batimento (ISO 1101)

## 7.11 Critérios para a especificação de tolerâncias geométricas

As tolerâncias geométricas devem ser especificadas tendo em conta os requisitos funcionais, embora os requisitos de fabricação e de controlo possam ter, também, alguma influência neste tipo de toleranciamento. Por conseguinte, não existe qualquer sistema normalizado que contemple a indicação de valores a atribuir às tolerâncias geométricas individuais inscritas na documentação técnica de produtos. A indicação de uma tolerância geométrica num desenho não implica, necessariamente, a utilização de um qualquer método particular de fabricação, de medição ou de verificação.

Deve ter-se ainda em consideração que determinados tipos de tolerâncias, que limitam certos desvios geométricos, restringem, ao mesmo tempo, outros desvios desse mesmo elemento (p. ex. um desvio de retitude é também limitado através de uma tolerância de paralelismo). Logo, raramente será necessário toleranciar todas as características geométricas, uma vez que a zona de tolerância definida pela especificação de um dado símbolo de tolerância pode englobar vários tipos de desvios. Pelo contrário, outros tipos de tolerâncias não limitam determinados desvios (p. ex. uma tolerância de retitude não limita um desvio de paralelismo).

O domínio de existência de um elemento geométrico, criado pela sua zona de tolerância de posição, limita de facto os seus desvios de posição, de orientação e de forma, não sendo possível registar-se uma situação inversa. Uma zona de tolerância de orientação limita os desvios de orientação e também os de forma, mas uma ocorrência contrária não se pode verificar. Finalmente, uma tolerância de forma limita apenas os desvios de forma.

No entanto, de acordo com os requisitos funcionais, pode ser necessário toleranciar individualmente uma ou mais características, para definir os desvios geométricos de um elemento (ver exemplo na figura 7.153). Neste caso, se houver necessidade de especificar valores de tolerância diferentes para características de posição, de orientação e de forma de um dado elemento geométrico, esses valores deverão ser, obrigatoriamente, restritivos uns em relação aos outros, de acordo com a seguinte relação:

$$\text{tolerância de posição} > \text{tolerância de orientação} > \text{tolerância de forma} \quad (7.17)$$

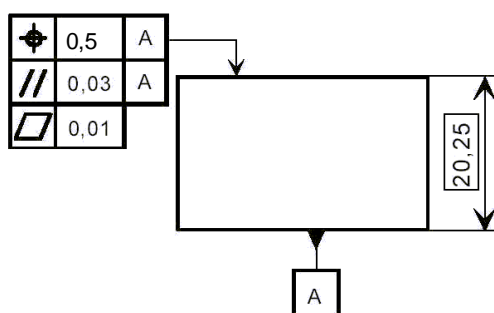


Figura 7.153 – Exemplo de relações entre especificações geométricas. Adaptada de [S1]



A especificação de tolerâncias geométricas em peças componentes de sistemas mecânicos deve ser realizada a partir de uma análise funcional prévia, baseada nos correspondentes desenhos de conjunto, de modo a refletir o desempenho previsto para as diferentes peças. O conhecimento sobre qual a função exercida por cada uma das peças, no sistema, e o modo como é montada e interage com as outras peças permite o estabelecimento de referências e sistemas de referências especificadas, relativamente aos quais deverão ser referidas as tolerâncias de posição dos seus diferentes elementos funcionais, bem como a indicação das tolerâncias dos elementos de tamanho que intervêm nos diferentes ajustamentos. Se necessário, os requisitos dos elementos funcionais posicionados em relação às referências especificadas, poderão ainda ser refinados através da indicação de tolerâncias de orientação e de forma [ver exemplo na figura 7.154 a)].

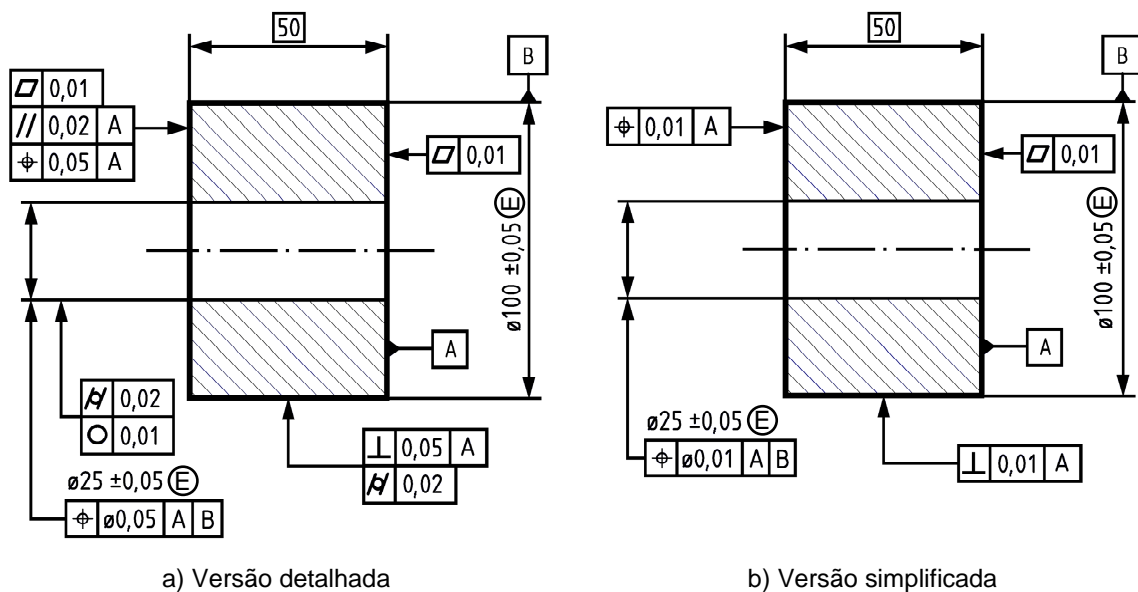


Figura 7.154 – Exemplo de procedimentos alternativos de especificação geométrica. Adaptada de [N3]

Uma objeção corrente a este tipo de procedimento prende-se com o facto do desenho resultante se tornar “muito complicado para o mundo real”. No entanto, se o desenho em causa representar os requisitos funcionais verdadeiros, poderá ser substituído por um desenho mais simples, mas com requisitos muito mais apertados [ver exemplo na figura 7.154 b)] [N3].

Uma aplicação sistemática da linguagem GPS, de acordo com o procedimento em apreço, permite:

- Aumentar as tolerâncias disponíveis, porque as tolerâncias indicadas são específicas de cada uma das características geométricas.
- Tornar mais fácil a compreensão da função desempenhada pela peça, uma vez que o desenho só contém requisitos funcionais. Os desenhos de execução podem ser realizados, de seguida, e modificados à medida que mudam as capacidades de fabricação.
- Colocar à disposição a maioria dos ganhos potenciais resultantes desses desenhos aperfeiçoados.

A determinação de requisitos funcionais e dos valores das tolerâncias é relativamente fácil nos casos de ajustamentos, mas, para funções complexas das peças, pode tornar-se dispendiosa, sendo crítica para o desempenho, a fiabilidade e a longevidade destas. A indicação de valores para as tolerâncias geométricas individuais, a especificar na documentação técnica, pode ser realizada com base em recomendações gerais ou específicas existentes na literatura técnica ou a partir de ensaios de prototipagem.

Nos quadros 7.17 e 7.19, apresentam-se dois exemplos de entre os diferentes tipos de informações técnicas, relativas à especificação de valores para tolerâncias geométricas diretamente inscritas nos desenhos, que podem ser encontrados na literatura da especialidade. Os valores indicados devem ser encarados apenas como uma primeira estimativa.

Quadro 7.17 – Tolerâncias geométricas – valores de primeira estimativa para aplicações correntes [C2, R2]

Características geométricas		Tolerâncias [mm]		Dimensão [m] do elemento ou da relação entre elementos a considerar no cálculo da tolerância
		Larga*	Reduzida*	
Tolerâncias de forma				
Retitude		0,1 mm/m	0,02 mm/m	Comprimento ( <i>l</i> )
Circularidade		IT 8	IT 5	Diâmetro ( $\varnothing$ )
Perfil de uma linha				
Planeza		0,1 mm/m	0,04 mm/m	Maior das dimensões laterais da superfície ou $\varnothing$
Cilindricidade		0,04 mm/m	0,02 mm/m	Maior dimensão entre o $\varnothing$ e o comprimento ( <i>l</i> )
Perfil de uma superfície				
Tolerâncias de orientação				
Paralelismo		IT 9	IT 5	Distância entre elementos
Perpendicularidade		0,4 mm/m	0,1 mm/m	Dimensão perpendicular à referência
Inclinação		0,4 mm/m	0,1 mm/m	Dimensão inclinada em relação à referência
Tolerâncias de posição				
Localização		IT 11	0,02 mm	Distância em relação à referência (c/ toler. larga)
Coaxialidade / concentricidade		0,02 mm	0,005 mm	Valores fixos
Simetria		IT 11	0,02 mm	Largura ( <i>l</i> ) (c/ a toler. larga)
Tolerâncias de batimento				
Batimento circular				
Batimento total				
* Valores dados a título de primeira estimativa para aplicações correntes.				

A título de exemplo, considere-se o caso de um veio rotativo apoiado em dois rolamentos, rígidos, de uma carreira de esferas, 6206 ( $d = 30$ ,  $D = 62$  e  $B = 16$ ), da classe de tolerância normal, que, por sua vez, estão alojados em caixas existentes no corpo fixo de um dado sistema mecânico, e admita-se que se pretende especificar as tolerâncias de cilindridade das superfícies do veio e das caixas do corpo conjugadas com os anéis dos rolamento. No quadro 7.18, apresentam-se os valores calculados a partir do catálogo FAG [F1] e das expressões indicadas no quadro 7.17, em função dos diâmetros dos dois anéis que são, neste caso, as dimensões determinantes.

Quadro 7.18 – Cálculo de tolerâncias geométricas de cilindridade das superfícies das peças conjugadas com os anéis dos rolamentos 6206

Elementos geométricos	Tolerâncias [mm]		Dimensão do elemento geométrico a considerar no cálculo da sua tolerância
	Larga	Reduzida	
Tramos do veio conjugados com os anéis internos dos rolamentos			
Catálogo FAG [F1, p.92]	IT4/2	(IT3/2)	Diâmetro interno $d = 30$ mm
	<b>0,003</b>	(0,002)	
Quadro 7.17 [C2, R2]	0,04 mm/m	0,02 mm/m	Diâmetro interno $d = 30$ mm = 0,030 m
	0,0012	0,0006	
Caixas alojadoras dos anéis externos dos rolamentos			
Catálogo FAG [F1, p.92]	(IT6/2)	IT5/2	Diâmetro externo $D = 62$ mm
	(0,0095)	<b>0,0065</b>	
Quadro 7.17 [C2, R2]	0,04 mm/m	0,02 mm/m	Diâmetro externo $D = 62$ mm = 0,062 m
	0,0025	0,0012	

O exemplo em análise mostra que as tolerâncias de cilindridade, de primeira escolha, calculadas através do catálogo FAG são cerca de três vezes maiores do que as tolerâncias largas determinadas através das expressões indicadas no quadro 7.17, o que confirma a cautela que deve ser posta na utilização destes valores genéricos indicados a título de primeira estimativa.

Por sua vez, os valores de tolerâncias para diferentes características geométricas, apresentados no quadro 7.19, têm em conta as diferentes funções desempenhadas pelas superfícies e as exatidões dos conjuntos. Os valores referidos são dados a título indicativo e não podem ser vistos como uma referência absoluta para todos os casos práticos [M2].

Quadro 7.19 – Valores de tolerâncias geométricas [mm] adequados para diferentes funções das superfícies [M2]

Funções	Superfícies em bruto s/ contacto	Superfícies com contacto fixo	Centragem. Guiamento. Contacto c/ atrito, de pequena ou média velocidade	Contacto c/ atrito de grande velocidade. Vedação. Alta exatidão
Exatidão do conjunto	Grosseira	Corrente	Cuidada	
Retitude	0,05 /100	0,02 /100	0,01 /100	
Planeza	0,06 a 0,03 /100	0,03 a 0,02 /100	0,01 / 100	
Circularidade	0,05	0,02	0,01	
Cilindricidade	0,1 /100	0,05 /100	0,02 / 100	
Paralelismo	0,1	0,05	0,02	
Perpendicularidade	0,1	0,05	0,02	
Inclinação	0,1	0,05	0,02	
Localização	Variáveis de acordo c/ a realização: apoio, nónio, leitor óptico, ...			
Coaxialidade	0,3 c/ mais do que um aperto 0,02 c/ um único aperto	0,1 c/ mais do que um aperto 0,01 c/ um único aperto	0,005 c/ um único aperto	
Simetria	0,2	0,1	0,05	

**Nota:** Os valores das tolerâncias de forma indicados são mínimos compatíveis com a exatidão do conjunto.

A norma ASME Y14.5, ao estabelecer que o requisito de envolvente é a especificação, por omissão, para elementos de tamanho (Regra #1), indica que as tolerâncias geométricas de forma devem ser menores do que as tolerâncias dimensionais (de tamanho) dos elementos ( $t_g \leq t_p$ ), mas no caso de






aplicação do princípio de independência, como o requisito de forma perfeita na condição de máximo de matéria do elemento foi removido, as tolerâncias de forma poderão ser maiores do que as tolerâncias dimensionais. Por sua vez, no contexto de aplicação da Regra #1 e a título de orientação geral, Gooldy [G1, G2] indica que as tolerâncias geométricas individuais,  $t_G$ , a especificar num elemento geométrico, não deverão exceder metade da tolerância dimensional,  $t_D$ , ( $t_G \leq 0,5 t_D$ ).

Henzold [H1, p.31] indica que é uma prática muito corrente a especificação de tolerâncias de forma para os elementos de referência, que constituem as referências especificadas, com valores menores ou iguais a 20 % (1/5) da tolerância geométrica referida a essa referência especificada. Desse modo, a peça a verificar não estará sujeita a uma oscilação significativa, evitando ter-se de proceder ao seu alinhamento.

Acresce ainda que alguns documentos técnicos apresentam também uma possibilidade de cálculo de determinadas tolerâncias geométricas de orientação e de posição, em elementos de peças conjugadas que materializam ligações com folga. Como hipóteses de base para o cálculo, assume-se que os elementos considerados são de forma perfeita e estão na sua condição de máximo de matéria, de modo que a folga mínima registada entre eles possa acomodar as tolerâncias geométricas a especificar, ver Apêndice B da ASME Y14.5 e [C2]. Na secção 8.3 deste texto, este assunto é abordado no âmbito do tratamento do requisito do máximo de matéria.

Finalmente, a escolha dos processos de fabricação é feita pelo gabinete de métodos da empresa, em função do grau de qualidade desejado para a peça, por um lado, e do parque de máquinas existente, por outro. A exatidão das dimensões a realizar mas também os desvios geométricos e o estado das superfícies a obter dependem da escolha do processo de fabricação [B2]. No quadro 7.19, a título meramente indicativo, apresentam-se valores para alguns dos desvios geométricos que podem ser obtidos através de diferentes processos de fabricação.

Quadro 7.19 – Valores de desvios geométricos [mm] que podem ser obtidos através de diferentes processos de fabricação [B2, L1]

Processos de fabricação					
Sinterização		0,02			0,02
Aplainamento	0,1 / 100	0,05	0,1	0,1	
Fresagem	0,02 a 0,05 / 100	0,02 a 0,1 / 100			
Fresagem c/ aço rápido		0,05 – 0,01	0,03	0,01	0,005 – 0,02
Fresagem c/ carboneto		0,02 – 0,01	0,02	0,01	
Torneamento	0,02 a 0,05 / 100	0,01 a 0,1 / 100			
Torneamento de acabamento		0,02 – 0,01	0,02	0,01	0,005 – 0,01
Torneamento c/ diamante policristalino		0,01	0,02	0,01	0,01
Furação c/ broca		0,2	0,1	0,1	0,1
Mandrilagem		0,005	0,01	0,01	0,01
Brochagem		0,002			0,002
Retificação	0,005 a 0,01 / 300	0,005 a 0,01 / 100			
Retificação de precisão		0,001	0,001	0,002	0,002
"Honing"		0,0005	0,001	0,002	0,002
Superacabamento		0,0005	0,001	0,002	0,005

Os valores indicados no quadro 7.19 devem ser lidos e considerados apenas como valores de referência, num contexto de constante evolução tecnológica, que se traduz numa melhoria contínua das capacidades produtivas de equipamentos e ferramentas. Em complemento ao estabelecimento do processo de fabricação a utilizar, não devem ser negligenciados os efeitos derivados da fixação e da flexão, dos tratamentos térmicos, dos revestimentos, etc., que podem provocar deformações nas peças.

Por outro lado, a especificação dos valores das tolerâncias geométricas individuais, adequadas à satisfação dos requisitos funcionais mais complexos das peças, nomeadamente ao nível das suas interfaces dinâmicas, é quase sempre baseada em ensaios experimentais com protótipos [N2, N3].

Num **processo de prototipagem clássico**, começa-se por produzir um conjunto de peças cujos valores das suas características geométricas são posteriormente determinados por meio de medições. Em seguida, esses protótipos são ensaiados em condições reais de funcionamento e os intervalos de valores previamente medidos, relativos às peças que se verificou terem tido um comportamento adequado, são transformados em tolerâncias. Nesse caso, é imperioso que os detalhes do processo de medição e dos ajustes dos instrumentos sejam comunicados, aos Serviços de conceção, como detalhes da especificação do produto, caso contrário, o trabalho de prototipagem será desperdiçado e a tolerância perderá o seu significado.

As tolerâncias a especificar na documentação técnica devem, pois, ser expressas como conjuntos ordenados de operações (**operadores**) onde se incluem, por exemplo, indicações sobre os requisitos de filtragem, a definição da direção segundo a qual se aplica o requisito, a definição dos limites do elemento geométrico correspondente, etc.

A título de exemplo, recorde-se o caso analisado, na figura 7.142, onde se mostra como a especificação de um valor derivado de um processo de prototipagem, relativo a uma tolerância geométrica inscrita num desenho, não sendo acompanhada das características da operação de filtragem que esteve na sua origem, permite que, no processo de verificação, os metrologistas façam uma escolha aleatória dos métodos e do equipamento de medição e acabem, involuntariamente, por estabelecer as características funcionais da peça ou então a função desta seja decidida através do software integrado no equipamento de medição.

Henzold [H1] afirma que, para aplicações de utilização corrente (com tolerâncias geométricas maiores do que 20  $\mu\text{m}$ ), as especificações geométricas tradicionais, atrás descritas, podem ser consideradas suficientes, sendo também mais fáceis de interpretar. No entanto, quando são requeridas tolerâncias muito pequenas, poderá ser necessário proceder-se a uma indicação mais detalhada das condições (filtragem, critério de associação, etc.) que deverão ser respeitadas na verificação dessas especificações geométricas, uma vez que as atuais normas ISO não especificam quaisquer condições por omissão. A título de exemplo, assinala o caso de um pistão da bomba de injeção de

um motor diesel, em que são requeridas tolerâncias menores ou iguais a 1  $\mu\text{m}$ , para as características de rugosidade, ondulação, circularidade e tamanho.

## 7.12 Considerações finais

O conceito de **tolerâncias geométricas** surgiu por volta da II Guerra mundial, quando a indústria de defesa do Reino Unido e as indústrias de defesa e automóvel dos USA principiaram a sentir a necessidade de definir novas linguagens gráficas que lhes permitissem descrever melhor as características geométricas essenciais para o cumprimento dos diferentes requisitos funcionais dos produtos.

Estas indústrias começaram a registrar a ocorrência de elevadas taxas de rejeição de peças, que não possuíam as características adequadas à sua montagem correta nos respetivos conjuntos, devido às limitações derivadas da utilização de sistemas de coordenadas com tolerâncias  $\pm$  e da ausência de informação integral e completa nos desenhos de engenharia.

Até à década de 60, o Exército americano foi um dos principais promotores do desenvolvimento da normalização nestes domínios, uma vez que, à época, alguns dos mais importantes Organismos Nacionais de Normalização (ONN) consideravam ser prematura a introdução de símbolos ou indicações de tolerâncias geométricas, uma vez que havia a ideia de que a indústria, em geral, não se iria habituar aos novos métodos de toleranciamento.

Na segunda metade da década de 60, nos USA, foi finalmente editada a USASI Y14.5:1966, a primeira norma unificada e aceite como norma americana de “cotagem e toleranciamento”, e a ISO publicou a ISO/R 1101-1:1969, o seu primeiro documento normativo no domínio do toleranciamento geométrico. Nas décadas seguintes estes documentos foram revistos e complementados com a edição de outras normas, com novas noções que vieram enriquecer a linguagem de especificação geométrica. Este conjunto de normas assentava, fundamentalmente, em conceitos relativos a uma metrologia convencional, baseada em instrumentos de medição (“*hard gauging*”) e a sua maioria esteve ainda em vigor durante grande parte da primeira década do século XXI.

Em 1985, com a edição da norma ISO 8015, que passou a especificar o “**princípio de independência**” como princípio fundamental de toleranciamento, sempre que, no interior ou junto da legenda do desenho, estivesse inscrita a indicação “Toleranciamento ISO 8015”, o toleranciamento geométrico viu ainda mais reforçada a sua importância, sobretudo ao nível da especificação geométrica de elementos de tamanho (“*features of size*”). A opção atual da ISO pelo “princípio de independência”, por omissão, é uma das principais divergências face aos procedimentos da norma ASME Y14.5, que continua a especificar que os limites das dimensões “tamanhos” devem ser verificados através de meios que emulem o requisito de envolvente (*Rule #1*).

Na década de 80, a utilização industrial de máquinas de medição de coordenadas (CMMs), no controle de produção das peças, teve um grande incremento, mas cedo se começou a verificar que os algoritmos numéricos residentes nas CMMs forneciam resultados diferentes dos obtidos através da metrologia convencional. Esta divergência despoletou uma “crise metrológica” que começou a ser efetivamente abordada e solucionada, na década seguinte, com o desenvolvimento de trabalhos com vista à racionalização e matematização dos toleranciamentos indicados na documentação técnica e da metrologia.

Por outro lado, os desvios geométricos de forma passaram a ter de ser limitados, por meio de tolerâncias, a um nível maior do que no passado, com vista a que pudesse ser assegurada a correta função da peça e a relevância da sua cotação e toleranciamento dimensionais, uma vez que o desenvolvimento registado nos processos de fabricação levou a que os desvios dimensionais e os desvios geométricos obtidos pudessem ter uma ordem de grandeza idêntica.

Está-se também a chegar a uma fase em que os valores das tolerâncias dimensionais e geométricas de forma, passíveis de serem especificados, estão a atingir uma magnitude tão pequena que a influência do estado de superfície (rugosidade), na sua avaliação, passa a ser significativa. Neste contexto, o toleranciamento geométrico de forma realizado de modo tradicional, baseado em zonas de tolerância simples, torna-se inadequado, uma vez que o projetista fica impossibilitado de indicar, na especificação geométrica inscrita na definição do produto, até que ponto é que as características do estado de superfície (ondulação e rugosidade) deverão ser consideradas ou ignoradas na verificação de tolerâncias geométricas de forma.

A definição de requisitos geométricos, através de zonas de tolerância simples, funciona bem para caracterizar a função de ajustamento que assegura a capacidade de montagem das peças, mas é menos adequada para a caracterização de outros requisitos funcionais, importantes na indústria moderna, tais como a resistência ao desgaste, a eliminação de fugas de fluidos e da ocorrência de gripagem em regime dinâmico, o comportamento a pressão elevada, as vedações metal-metal, a limitação de ruído em rolamentos, etc.

A criação do Comité técnico ISO/TC 213 “Especificações e verificação dimensionais e geométricas de produtos”, em 1996, contribuiu decididamente para o estabelecimento das bases para uma nova linguagem GPS que permite definir uma especificação geométrica como um conjunto ordenado de operações (designado de **operador**) que, por sua vez, pode ser considerado como uma instrução virtual de medição, em que cada operação e os seus parâmetros definidores são passos do processo de medição.

Atualmente, as normas ISO em vigor ou em fase de revisão, neste domínio, assentam numa linguagem GPS baseada em princípios matemáticos e numa metrologia digital computadorizada, pretendendo-se que a nova geração de normas sobre tolerâncias geométricas possa vir a possibilitar, nomeadamente:

- uma aplicação mais rigorosa do “princípio de independência”, na documentação técnica de produtos, que passou a ser empregue por omissão, devendo recorrer-se a símbolos modificadores da especificação apropriados, sempre que tal se justifique;
- o estabelecimento de referências especificadas e sistemas de referências especificadas, com base na função da peça, a partir de superfícies pertencentes a todas as classes de invariância, de modo a permitir a restrição dos graus de liberdade necessária para a fabricação e verificação da peça;
- a indicação de operadores (conjuntos ordenados de operações) de especificação especiais para as tolerâncias geométricas (de forma, de orientação, de posição) e para as referências especificadas e sistemas de referências especificadas, contemplando a possibilidade da inclusão de operações de filtragem e de associação, com vista a reduzir a correspondente ambiguidade (incerteza) da especificação;
- a indicação de elementos geométricos auxiliares de modo a permitir estender, às peças reais, geometricamente imperfeitas, a interpretação de determinadas especificações inscritas nos desenhos 2D em representação ortográfica (com um significado teoricamente exato) e possibilitando a sua utilização simultânea em anotações realizadas em vistas axonométricas 3D, elaboradas em desenhos 2D, e em modelos virtuais 3D.

A indicação de uma operação de filtragem pode ser utilizada para atenuar algum nível de detalhe num elemento, permitindo assim estabelecer a especificação que melhor defina os requisitos para os restantes pormenores da superfície. Filtros diversos removem diferentes tipos de pormenores e podem ser utilizados para melhorar a comunicação de funções distintas, através da especificação geométrica. Alguns filtros tendem a menosprezar os extremos e a focar-se no nível médio da superfície, enquanto outros têm tendência a concentrar-se nos seus picos mais elevados ou nos seus vales mais profundos. A seleção do filtro que melhor descreve as necessidades funcionais de uma superfície depende exclusivamente da função desta.

A indicação de uma operação de associação pode ser necessária no âmbito da avaliação de desvios geométricos e do estabelecimento de referências especificadas. Tradicionalmente esta operação era efetuada com o auxílio de planos de traçagem e controlo, mandris, dispositivos de medição especiais, etc. No entanto, uma vez que a metrologia digital computadorizada se tornou o meio de referência, a nível industrial, para a verificação dimensional e geométrica de produtos, nomeadamente através da utilização de máquinas de medição de coordenadas (CMM) e de equipamento de varrimento laser, a operação de associação passou a ser abordada como um problema de otimização, com ou sem restrições, resolvido através de métodos numéricos.

Finalmente, deve assinalar-se que algumas empresas importantes na área do desenvolvimento e comercialização de *software* de CAD já manifestaram a intenção de introduzir muitos dos novos



conceitos GPS nas novas versões dos seus sistemas de CAD 2D e 3D, em preparação para lançamento no mercado.

## 7.13 Referências

- [B1] – BOOKER, P. J. – *A History of Engineering Drawing*. London: Chatto & Windus, Ltd., 1963.
- [B2] – BOULANGER, J. – *Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface* [Em linha]. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, B 7010. Paris: France. 1991. 27 p. [Consult. 5 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<ftp://80.14.158.64/2.Documents/2.3.Documents.Techniques/2.3.7.Les%20Techniques%20de%20l'ingenieur/B%20et%20C/B7010.pdf>>.
- [B3] – *Business Plan of ISO/TC 213 – Dimensional and geometrical product specifications and verification* [Em linha]. Versão 5 Draft 1. ISO, 2008-01-09, 14 p. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO\\_TC\\_213\\_Dimensional\\_and\\_geometrical\\_product\\_specifications\\_and\\_verification\\_.pdf?nodeid=999295&vernum=-2](http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO_TC_213_Dimensional_and_geometrical_product_specifications_and_verification_.pdf?nodeid=999295&vernum=-2)>.
- [C1] – CEN/TC 290 – *Results of voting on prEN 15391-2 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Roundness – Part 2: Specification operators (ISO/TS 12181-2:2003)*. CEN/TC 290 N 225, 2006.
- [C2] – CHEVALIER, A. – *Guide du dessinateur industriel*. Paris: Hachette Technique, 1998.
- [C3] – CONCHERI, G. – *Le nuove norme impongono un cambio radicale dell'insegnamento del disegno* [Em linha]. Giornata Naz. ADM – La rivoluzione dell'insegnamento del disegno: le nuove normative ISO e ASME. Torino, 28 maggio 2014. [Consult. 2 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://adm.ing.unibo.it/Files/Concheri\\_Giornata\\_Naz\\_ADM\\_28mag14.pdf](http://adm.ing.unibo.it/Files/Concheri_Giornata_Naz_ADM_28mag14.pdf)>.
- [C4] – COOREVITS, T.; DAVID, J-M. – *Le Controle Tridimensionnel sur machine à mesurer et machine-outil*. Paris: Renishaw/Techno-Nathan. 1991.
- [F1] – FAG. – Rolamentos FAG. Programa Standard. Catálogo WL 41510/3 PC. Porto: FAG Portuguesa, Lda. 1992.
- [F2] – FENG, S. C.; HOPP, T. H. – *A review of Current Geometric Tolerancing Theories and Inspection Data Analysis Algorithms* [Em linha]. National Institute of Standards and Technology (NISTIR 4509), Gaithersburg. 1991, 19 p. [Consult. 22 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.mel.nist.gov/msidlibrary/doc/feng91.pdf>>.
- [G1] – GOOLDY, G. – *Geometric Dimensioning & Tolerancing*. Rev. ed. USA.: Prentice-Hall, 1995. ISBN 0-13-398959-3.
- [G2] – GOOLDY, G. – *Dimensioning, Tolerancing, and Gaging Applied*. Rev. ed. USA.: Prentice-Hall, 1999. ISBN 0-13-791600-0.
- [G3] – GOSAVI, A.; CUDNEY, E. – *Form Errors in Precision Metrology: A Survey of Measurement Techniques* [Em linha]. Quality Engineering. 2012, vol. 24, nº 3, p. 369-380, DOI: 10.1080/08982112.2011.652583. [Consult. 22 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://dx.doi.org/10.1080/08982112.2011.652583>>.
- [H1] – HENZOLD, H. – *Geometrical Dimensioning And Tolerancing for Design, Manufacturing And Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. 2ª ed. U.K.: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 978-0-7506-67388.

- [H2] – HOPP, T. – *Computational Metrology* [Em linha]. Manufacturing Review. USA: ASME. 1993, 6(4), p. 295-304. [Consult. 10 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.nist.gov/calibrations/loader.cfm?csModule=security/getfile&pageid=1537213>>.
- [J1] – JAKUBIEC, W.; STARCZAC, M. – *Datums*. In HUMIENNY, Z. [et al.] – *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House, 2001, cap. 9. ISBN 83-912190-8-9.
- [K1] – KRULIKOWSKI, A. – *Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing*. 2ª ed. USA: Delmar Publishers edition, 1998. ISBN 0-8273-7995-1.
- [K2] – KRYSTEK, M.; SCOTT, P. J.; SRINIVASAN, V. – *Discrete Linear Filters for Metrology* [Em linha]. XVI IMEKO World Congress. Setember 25-28, 2000, Vienna, Austria. [Consult. 25 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://home.mit.bme.hu/~kollar/IMEKO-procfiles-for-web/congresses/WC-16th-Wien-2000/Papers/Topic%2014/Krystek.PDF>>.
- [L1] – LOPES, O. – *Tecnologia Mecânica – Elementos para Fabricação Mecânica em Série*. S. Paulo: Editora Edgard Blücher. Ltda., 1983.
- [L2] – LOU, S.; JIANG, X.; SCOTT, P. J. – *Morphological filters for functional assessment of roundness profiles* [Em linha]. Measurement Science and Technology. 2014, 25 (6). 065005. ISSN 0957-0233. [Consult. 16 ago. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://eprints.hud.ac.uk/20373/1/Morph\\_Filter\\_for\\_Roundness\\_V2.pdf](http://eprints.hud.ac.uk/20373/1/Morph_Filter_for_Roundness_V2.pdf)>.
- [M1] – MALBURG, M. C. – *Fitting, Filtering and Analysis: Feature Extraction in Dimensional Metrology Applications* [Em linha]. International Dimensional Workshop 2002. May 6-8, 2002, Knoxville, Tennessee, USA. [Consult. 25 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.digitalmetrology.com/Papers/IDW2002-Abstract.pdf>>; slides em WWW:<URL:<http://www.digitalmetrology.com/Papers/IDW2002-Slides.pdf>>.
- [M2] – *Mémento des Conventions de Dessin en Mécanique*. – Formation Professionnelle des Adultes. Ministère du travail. Afpa – Association Nationale pour la Formation Professionnelle des Adultes. Montreuil: AFPA. 1976.
- [M3] – MORSE, E. – *Tolerancing Standards: A Comparison*. Quality Magazine. USA. August 2016, p. 40-43.
- [M4] – MURALIKRISHNAN, B.; RAJA, J. – *Computational Surface and Roundness Metrology*. London: Springer-Verlag London Limited, 2009. ISBN 978-1-84800-296-8.
- [N1] – NASSEF, A. O.; EI MARAGHY, H. A. – *Determination of Best Objective Function for Evaluating Geometric Deviations* [Em linha]. Intern. J. Manufact. Technol. 1999, 15, p. 90-95. U.K.: Springer-Verlag London Ltd. [Consult. 25 Out. 2013]. Disponível em WWW:<URL:<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs001700050044>>.
- [N2] – NIELSEN, H. S. – *Specifications, operators and uncertainties* [Em linha]. 8th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing – Managing Geometric Uncertainty in the Product Lifecycle. April 28-29, 2003, Univ. of North Caroline, Charlotte, USA. [Consult. 25 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://isotc213.ds.dk/article/CIRP%20Specifications%20operators%20and%20uncertainties.pdf>>.
- [N3] – NIELSEN, H. S. – *Communicating Functional Requirements with GD&T* [Em linha]. Proceedings of the 2004 International Dimensional Metrology Workshop. Nashville, Tennessee, USA. [Consult. 25 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.hn-metrology.com/Papers/Communicating%20functional%20requirements%20with%20GDT.pdf>>; slides em WWW:<URL:<http://www.hn-metrology.com/Papers/Communicating%20functional%20requirements.pdf>>.
- [N4] – NOBLE, G. – *A New Canadian Drawing Standard*. Dominion Engineer. Montreal, Canada: Dominion Engineering Co. Ltd. 1959, vol. 26, nº 4.

- [R1] – RAJA, J.; MURALIKRISHNAN, B.; FU, S.; LIU, X. – *Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form* [Em linha]. Precision Engineering. 2002, vol. 26, nº 2, p. 222-235. [Consult. 29 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.aspe.net/publications/Annual\\_2000/PDF/PAPERS/SURFFORM/RAJA2.PDF](http://www.aspe.net/publications/Annual_2000/PDF/PAPERS/SURFFORM/RAJA2.PDF)>.
- [R2] – RICORDEAU, A.; COMPAIN-MEFRAY, P. – *Méthode active de dessin technique*. Paris: Editions Casteilla, 1987. ISBN 2-7135-0688-3.
- [S1] – SCHNEIDER, F. – *Tolérancement Géométrique: Interprétation*. IUFM de Lorraine. Metz: Université de Metz. 2005. 106 p.
- [S2] – SHAKARJI, C. M.; SRINIVASAN, V. – *Theory and Algorithms for Weighted Total Least-Squares Fitting of Lines, Planes, and Parallel Planes to Support Tolerancing Standards* [Em linha]. Journal of Computing and Information Science in Engineering. USA: ASME. 2013, vol. 13, 11 p. [Consult. 8 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.nist.gov/customcf/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=912180](http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=912180)>.
- [S3] – SILVA, D. C.; PASIN, A. O.; MARQUES, L. H. – *Curso Básico de GD&T EMBRAER: Segundo a norma ASME Y14.5M-1994 (NE 03-073)*. Projeto Análise de Tolerância. Embraer. Rev. B. Março de 2003.
- [S4] – SRINIVASAN, V.; SCOTT, P. J.; KRYSTEK, M. – *ISO Standards for Geometrical Filters* [Em linha]. XVI IMEKO World Congress. Setembro 25-28, 2000, Vienna, Austria. [Consult. 25 Out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://home.mit.bme.hu/~kollar/IMEKO-procfiles-for-web/congresses/WC-16th-Wien-2000/Papers/Topic%2014/Srinivasan.PDF>>.
- [S5] – SRINIVASAN, V. – *Computational Metrology for the Design and Manufacture of Product Geometry: A Classification and Synthesis* [Em linha]. Journal of Computing and Information Science in Engineering. USA: ASME. 2007, vol. 7, p. 3-9. [Consult. 10 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[https://computingengineering.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JCISB6/25972/3\\_1.pdf](https://computingengineering.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JCISB6/25972/3_1.pdf)>.
- [S6] – SRINIVASAN, V. – *Reflections on the role of science in the evolution of dimensioning and tolerancing standards* [Em linha]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. UK: IMechE. 2013, 227, p. 3-11. [Consult. 8 abr. 2013]. Disponível em WWW:<URL:<http://pib.sagepub.com/content/227/1/3.full.pdf>>.
- [V1] – VOELCKER, H. B. – *The current state of affairs in dimensional tolerancing: 1997* [Em linha]. Integrated Manufacturing Systems. USA: MCB University Press. 1998, vol. 9, nº 4, p. 205-217. ISSN 00957-6061. [Consult. 3 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=850763>>.
- [W1] – Wikipedia contributors – *Lp space* [Em linha]. Wikipedia, The Free Encyclopedia. [Consult. 6 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lp\\_space&oldid=697992417](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lp_space&oldid=697992417)>.
- [Z1] – ZHAO Y. [et al.] – *Information Modeling for Interoperable Dimensional Metrology* [Em linha]. U.K.: Springer-Verlag London Limited, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4471-2167-1\_1. [Consult. 22 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://alvarestech.com/temp/capp/Metrologia-CMM-ModeloInformacao-CAI.pdf>>.

### 7.13.1 Normalização

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| ASME Y14.5.1M-1994 (R 2004) | – Mathematical Definition of Dimensioning and Tolerancing Principles. ASME.                         |
| ASME Y14.5-2009             | – Dimensioning and Tolerancing – Engineering Drawing and Related Documentation Practices. ASME.     |
| BS 7172:1989                | – Guide to Assessment of position, size and departure from nominal form of geometric features. BSI. |

DIN 7184-1:1972	– Tolerances of Form and of Position: definitions, indications on drawings. DIN (substituída pela DIN ISO 1101:1985).
ISO/DIS 1101.2:2015	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
ISO 1101:2012/DAmD 1:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out – Amendment 1. ISO (anulada pela ISO/DIS 1101.2: 2014).
ISO 1101:2012 + Cor.1:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
ISO/DIS 1660:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Profile tolerancing. ISO.
ISO 1660:1987	– Technical drawings – Dimensioning and tolerancing of profiles. ISO.
ISO 2692:2014	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Maximum material requirement (MMR) and least material requirement (LMR) and reciprocity requirement (RPR). ISO.
ISO 3040:2016	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensioning and tolerancing – Cones. ISO.
ISO 4291:1985	– Methods for the assessment of departure from roundness – Measurement of variations in radius. ISO.
ISO/DIS 5458.2:2016	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Positional and pattern tolerancing. ISO.
ISO 5458:1998	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Positional tolerancing. ISO.
ISO 5459:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum-systems. ISO.
ISO/CD 5459-3.2:2002	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Datums and datum systems for geometrical tolerancing – Part 3: Association methods. ISO.
ISO 5459:1981	– Technical drawings – Geometrical tolerancing – Datums and datum-systems for geometrical tolerances. ISO (revista pela ISO 5459:2011).
ISO/TR 5460:1985	– Technical drawings – Geometrical tolerancing – Tolerancing of form, orientation, location and run-out – Verification principles and methods – Guidelines. ISO (anulada em 2013-10-14).
ISO 7083:1983	– Technical drawings – Symbols for geometrical tolerancing -- Proportions and dimensions. ISO.
ISO 8015:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals – Concepts, principles and rules. ISO.
ISO 8015:1985	– Technical drawings – Fundamental tolerancing principle. ISO (revista pela ISO 8015:2011).
ISO 10578:1992	– Technical drawings – Tolerancing of orientation and location – Projected tolerance zone. ISO (anulada em 2012-04-23).
ISO 10579:2010 + Cor 1: 2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensioning and tolerancing – Non-rigid parts. ISO.

ISO 11562:1996	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters. ISO (anulada em 2011-05-27 e substituída pela ISO 16610-21:2011).
ISO 12180-1:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Cylindricity – Part 1: Vocabulary and parameters of cylindrical form. ISO.
ISO 12180-2:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Cylindricity – Part 2: Specification operators. ISO.
ISO 12181-1:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Roundness – Part 1: Vocabulary and parameters of roundness. ISO.
ISO 12181-2:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Roundness – Part 2: Specification operators. ISO.
ISO 12780-1:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Straightness – Part 1: Vocabulary and parameters of straightness. ISO.
ISO 12780-2:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Straightness – Part 2: Specification operators. ISO.
ISO 12781-1:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Flatness – Part 1: Vocabulary and parameters of flatness. ISO.
ISO 12781-2:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Flatness – Part 2: Specification operators. ISO.
ISO 16610-1:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 1: Overview and basic concepts. ISO.
ISO 16610-20:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 20: Linear profile filters: Basic concepts. ISO.
ISO 16610-21:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters. ISO.
ISO 16610-22:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 22: Linear profile filters: Spline filters. ISO.
ISO/TS 16610-28:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 28: Profile filters: End effects. ISO.
ISO 16610-29:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 29: Linear profile filters: Spline wavelets. ISO.
ISO 16610-30:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 30: Robust profile filters: Basic concepts. ISO.
ISO/TS 16610-31:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 31: Robust profile filters: Gaussian regression filters. ISO.
ISO/TS 16610-32:2009	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 32: Robust profile filters: Spline filters. ISO.
ISO 16610-40:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 40: Morphological profile filters: Basic concepts. ISO.
ISO 16610-41:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 41: Morphological profile filters: Disk and horizontal line-segment filters. ISO.
ISO 16610-49:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 49: Morphological profile filters: Scale space techniques. ISO.
ISO 16610-60:2015	– Geometrical Product Specification (GPS) – Filtration – Part 60: Linear areal filters -- Basic concepts. ISO.
ISO 16610-61:2015	– Geometrical Product Specification (GPS) – Filtration – Part 61: Linear areal filters – Gaussian filters. ISO.

ISO 16610-71:2014	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 71: Robust areal filters: Gaussian regression filters. ISO.
ISO 16610-85:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 85: Morphological areal filters: Segmentation. ISO.
ISO 16792:2015	– Technical product documentation – Digital product definition data practices. ISO.
ISO 17450-2:2012	– Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 2: Basic tenets, specifications, operators, uncertainties and ambiguities. ISO.
ISO 22432:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Features utilized in specification and verification. ISO.
NF E 04-121:1970	– Dessins techniques – Inscription des tolérances de forme et de position. AFNOR (substituída pela NF E 04-552:1978).
NF E 04-552:1978	– Dessins techniques – Cotation et tolérancement – Tolérances géométriques – Généralités, symboles, indications sur les dessins. AFNOR (revista pela NF E 04-552:1983).
VDI/VDE 2631. Part 9:2003	– Form measurement – Part 9: Examples of measurement and analysis conditions. VDI.

## **CAPÍTULO 8**

**Requisitos de interdependência entre tamanho e geometria**





## Capítulo 8

# Requisitos de interdependência entre tamanho e geometria

## 8.1 Introdução

Atualmente, em termos internacionais, **o princípio fundamental** que estabelece o relacionamento entre as tolerâncias dimensionais (lineares e angulares) e as tolerâncias geométricas (de forma, orientação e posição), especificadas para cada componente, é **o princípio de independência** (ISO 8015 e ISO 14405-1), já tratado de modo desenvolvido no capítulo 5. No entanto, durante o processo de definição das tolerâncias de peças simples ou de grupos de componentes, para cada dimensão toleranciada, deve ser sempre analisado se o princípio de independência pode ser tomado em consideração ou se, por necessidades funcionais, deve ser adotada uma relação de interdependência entre tamanho e geometria, nomeadamente **o requisito de envolvente** **Ⓔ** (ISO 14405-1), adequado para assegurar um ajustamento simples, de contacto fixo ou móvel, entre elementos geométricos de peças conjugadas, também já abordado no capítulo 6.

Complementarmente, quando se torna necessário estabelecer uma **relação particular** entre tamanho e forma, tamanho e orientação ou tamanho e posição, com vista a controlar funções específicas das peças (a sua “aptidão para a montagem”, uma “espessura mínima de parede”, etc.), alterando assim o princípio fundamental de independência, especificado por omissão, deve também ser decidido se uma dada **tolerância geométrica** de forma, orientação ou posição pode ser especificada de modo independente ou se deve ser tomado em consideração **o requisito de máximo de matéria** **Ⓜ** ou **o requisito de mínimo de matéria** **Ⓛ**, eventualmente complementados pelo **requisito de reciprocidade** **Ⓡ** (ISO 2692), ver o esquema relacional da figura 5.1. Para além dos requisitos de toleranciamento atrás referidos, outras condições, tais como o **elemento toleranciado projetado** **Ⓟ**, (ISO 1101), ou o **toleranciamento de peças não rígidas** **ⓕ**, (ISO 10579), abordados no capítulo 7, são também utilizadas em desenhos técnicos.

O desenvolvimento e a aplicação do primeiro daqueles dois **requisitos de carácter coletivo** foram ditados pela necessidade de ultrapassar algumas das lacunas então registadas nos desenhos de engenharia, através da promoção de uma melhoria da “aptidão para a montagem” de peças pertencentes a sistemas mecânicos mais ou menos complexos. Em 1940, nos USA, a empresa Chevrolet editou “*The Draftsman’s Handbook*”, a primeira publicação com uma análise significativa sobre tolerâncias de localização e onde foi introduzida a “**condição de máximo de matéria**” (MMC – “*maximum material condition*”), ver secção 8.3 deste texto. Em 1941, o manual “*Aircraft Engine*

*Drafting Room Practice*“, da “*American Society of Automotive Engineers*” (SAE), introduziu uma forma elementar de cotação de localização teoricamente exata (“*true position*”) [G1, G2, K1, S2].

Em 1973, o ANSI – “*American National Standards Institute*” publicou a norma ANSI Y14.5 que incorporou toda a simbologia existente, substituindo as anotações relativas a tolerâncias geométricas por símbolos, estabeleceu uma classificação de tolerâncias, introduziu o toleranciamento de localização composto, a “**condição de mínimo de matéria**” (LMC – “*least material condition*”) (ver secção 8.4 deste texto) e as referências parciais (“*datum targets*”). Complementarmente, a título informativo, apresentava uma primeira explicação para a especificação de uma **tolerância geométrica zero na condição de máximo de matéria** (ver secção 8.3.2)

Em 1982, a norma ANSI Y14.5 passou a designar-se por ANSI Y14.5M e sofreu uma nova revisão, com a incorporação de nova simbologia, nomeadamente para a tolerância geométrica de batimento total, da especificação de uma **tolerância geométrica de localização zero na condição de máximo de matéria**, da “**condição de mínimo de matéria**” (LMC) para aplicações de toleranciamento de localização e de disposições relativas à cotação para CAD/CAM.

Por outro lado, em termos internacionais, o primeiro documento normativo editado pela ISO, no âmbito deste tipo de requisitos, foi a norma ISO 1101-2:1974 – “*Technical Drawings – Tolerances of form and of position – Part 2: Maximum material principle*”, que foi posteriormente revista, dando origem à norma ISO 2692:1988 – “*Technical Drawings – Geometrical tolerancing – Maximum material principle*”.

Em 1992, a norma ISO 2692 foi sujeita à emenda ISO 2692:1988/Amd.1:1992 – “*Technical Drawings – Geometrical tolerancing – Maximum material principle – Amendment 1: Least material requirement*”, para passar a incorporar o **requisito de mínimo de matéria** (LMR).

Em 1994, a norma ANSI Y14.5M foi revista e a sua designação foi alterada para ASME Y14.5M. Esta revisão introduziu o conceito de **tolerância zero na condição de mínimo de matéria**, para tolerâncias de posição e de orientação (ver secção 8.4.1 deste texto).

Por sua vez, a 2ª edição da norma ISO 2692 – “*Geometrical product specifications GPS) — Geometrical tolerancing – “Maximum material requirement (MMR), least material requirement (LMR) and reciprocity requirement (RPR)”*”, elaborada em 2006, passou também a incorporar o **requisito de reciprocidade** (RPR) (ver secção 8.5 deste texto) que tinha já sido proposto como norma, pelo Japão e pelos USA, no início dos anos 70, mas cuja introdução, à data, foi considerada prematura, por alguns países, tendo então sido adotado o toleranciamento de localização zero na condição de máximo de matéria como um seu substituto próximo (ASME Y14.5M-1994).

Finalmente, a atual norma ISO 2692:2014, resultante de uma revisão efetuada em algumas secções da edição anterior, fornece uma visão atualizada dos conceitos de base relativos à especificação dos **requisitos coletivos** de máximo de matéria, de mínimo de matéria e de reciprocidade.

## 8.2 Requisitos de interdependência: generalidades

A norma ISO 2692 define os requisitos de máximo de matéria, de mínimo de matéria e de reciprocidade, que são indicados nos desenhos, respetivamente, pelos símbolos modificadores  $\textcircled{M}$ ,  $\textcircled{L}$  e  $\textcircled{R}$ . Estes requisitos só podem ser aplicados a elementos de tamanho e são usados para controlar funções específicas de peças em que **o tamanho e a geometria são interdependentes**, de modo a assegurar, por exemplo, a sua “**aptidão para a montagem**” (no caso do requisito de máximo de matéria) e uma “**espessura mínima de parede**” (no caso do requisito de mínimo de matéria). No entanto, estes requisitos podem também ser utilizados para satisfazer outras condições funcionais de conceção.

Cada requisito de máximo de matéria ou de mínimo de matéria combina duas exigências de tolerância independentes num **requisito coletivo**, que simula, de um modo mais exato, a função pretendida para a peça e diz respeito apenas ao elemento integral, relacionado com a(s) superfície(s) do(s) elemento(s) de tamanho. Em alguns casos, estes requisitos podem ser complementados pelo requisito de reciprocidade.

O **requisito de máximo de matéria** e o **requisito de mínimo de matéria** podem ser aplicados a um ou mais elementos de tamanho (“*features of size*”), do tipo “cilindro” e do tipo “duas superfícies planas paralelas opostas”, na sua qualidade de elemento(s) toleranciado(s) e/ou de referência(s) especificada(s). Geram um requisito combinado entre o tamanho de elemento(s) de tamanho e os requisitos geométricos (de forma, orientação ou posição) especificados para o(s) seu(s) elemento(s) derivado(s) (linhas medianas ou superfícies medianas).

Na especificação geométrica, muitas vezes, os elementos roscados são considerados como elementos de tamanho do tipo cilindro. No entanto, a ISO 2692 não estabelece quaisquer regras para a aplicação dos requisitos de máximo de matéria e de mínimo de matéria, aos elementos roscados.

De acordo com a norma ASME Y14.5, as tolerâncias geométricas de circularidade, cilindridade, perfil de uma linha, perfil de uma superfície, concentricidade, simetria, batimento circular e batimento total devem ser especificadas apenas em conformidade com o princípio de independência, não podendo ser aplicadas com base no requisito de máximo de matéria ou de mínimo de matéria.

Vários elementos toleranciados especificados através do mesmo indicador de tolerância, com a inscrição do símbolo modificador  $\textcircled{M}$  ou  $\textcircled{L}$ , constituem uma configuração (“*pattern*”) de elementos com o mesmo significado do requisito resultante da indicação adicional do modificador **CZ** (ver o ISO/DIS 5458 e a ISO 2692).

A escrita de uma tolerância geométrica 0  $\textcircled{M}$  ou 0  $\textcircled{L}$  indica uma possibilidade de repartição arbitrária entre uma tolerância de tamanho e uma tolerância geométrica, sem ter de formalizar essa relação, contribuindo desse modo para uma diminuição das restrições impostas ao processo de fabricação.

### 8.2.1 Termos e definições

O significado de uma parte dos termos seguintes, definidos na norma ISO 2692, está explicitado na figura 8.1.

**Tamanho local real** (tamanho entre dois pontos): qualquer distância individual em qualquer secção reta de um elemento, p. ex. qualquer tamanho medido entre dois quaisquer pontos opostos, em conformidade com a norma ISO 14660-2.

**Tamanho de montagem** (“*mating size*”)

- a) **para um elemento exterior** (tamanho mínimo circunscrito): a dimensão,  $l_{MS,e}$ , do menor elemento perfeito que pode circunscrever o elemento e que é tangente à sua superfície nos pontos mais salientes (ver figura 8.1).
- b) **para um elemento interior** (tamanho máximo inscrito): a dimensão,  $l_{MS,i}$ , do maior elemento perfeito que pode ser inscrito no elemento e que é tangente à sua superfície nos pontos mais salientes.

**Condição de máximo de matéria (MMC – “*maximum material condition*”)**: estado do elemento extraído considerado, no qual o elemento de tamanho está no limite de tamanho em que a matéria do elemento está, em toda a parte, no seu máximo, por exemplo, **diâmetro mínimo do furo e diâmetro máximo do veio**. Com a adoção, por omissão, do princípio de independência, **um elemento neste estado não tem de ser obrigatoriamente de forma perfeita** (ver figura 8.1).

**Tamanho de máximo de matéria (MMS – “*maximum material size*”)**: dimensão,  $l_{MMS}$ , que define a condição de máximo de matéria de um elemento (ver figura 8.1).

**Tamanho virtual de máximo de matéria (MMVS – “*maximum material virtual size*”)**: tamanho,  $l_{MMVS}$ , gerado pelo **efeito coletivo** (a soma, para elementos exteriores, ver figura 8.1, e a diferença, para interiores) do tamanho de máximo de matéria,  $l_{MMS}$ , de um elemento de tamanho e da tolerância geométrica (de forma, orientação ou posição),  $t_G$ , especificada para o seu elemento derivado (linha mediana ou superfície mediana).

Para **elementos de tamanho exteriores**: 
$$l_{MMVS,e} = l_{MMS} + t_G \quad (8.1)$$

Para **elementos de tamanho interiores**: 
$$l_{MMVS,i} = l_{MMS} - t_G \quad (8.2)$$

O tamanho virtual de máximo de matéria,  $l_{MMVS}$ , representa a dimensão nominal de concepção do **calibre funcional** (“*functional gauge*”).

**Condição virtual de máximo de matéria (MMVC – “*maximum material virtual condition*”)**: estado do **elemento associado** de tamanho virtual de máximo de matéria,  $l_{MMVS}$ , (ver figura 8.1). A MMVC é uma condição de forma perfeita e pode incluir uma **restrição de orientação**, ver figuras 8.3 a) e 8.4, ou uma **restrição de posição** do elemento associado, ver figuras 8.3 b) e 8.4.

**Requisito de máximo de matéria (MMR – “maximum material requirement”):** requisito para um elemento de tamanho, que define um elemento geométrico do mesmo tipo e de forma perfeita, com um valor dado para a característica intrínseca (dimensão) igual ao MMVS, que limita o elemento não ideal pelo lado exterior da matéria. **O MMR é utilizado para controlar a “aptidão para a montagem” de uma peça.** Aplica-se também a elementos de referência correlacionados.

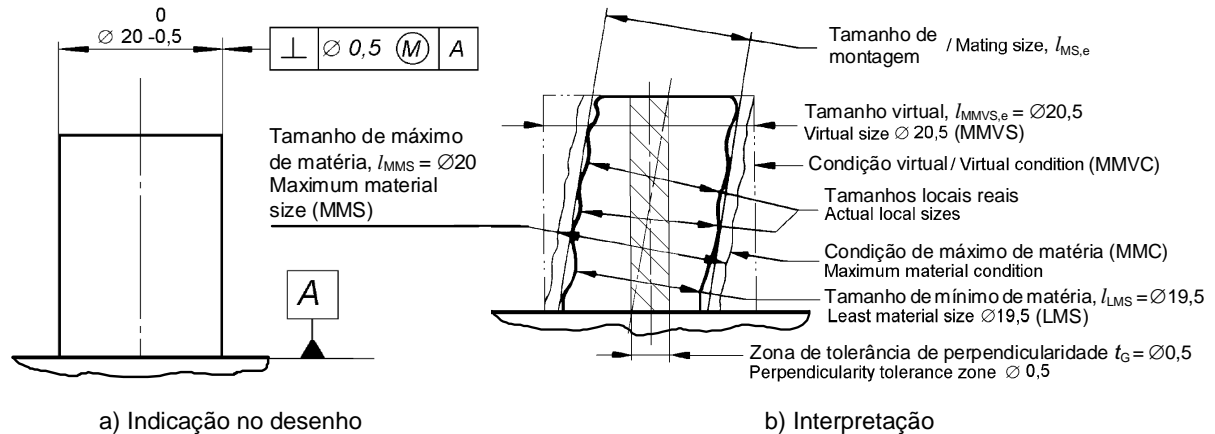


Figura 8.1 – Especificação geométrica de uma peça, em conformidade com o princípio de independência, englobando uma indicação do requisito de máximo de matéria. Adaptada da norma Volvo STD 112-0001

**Condição de mínimo de matéria (LMC – “least material condition”):** estado do elemento extraído considerado, no qual o elemento de tamanho está no limite de tamanho em que a matéria do elemento está, em toda a parte, no seu mínimo, por exemplo, **diâmetro máximo do furo e diâmetro mínimo do veio**. Com a adoção, por omissão, do princípio de independência, **um elemento neste estado não tem de ser obrigatoriamente de forma perfeita.**

**Tamanho de mínimo de matéria (LMS – “least material size”):** dimensão,  $l_{LMS}$ , que define a condição de mínimo de matéria de um elemento (ver figuras 8.1 e 8.27).

**Tamanho virtual de mínimo de matéria (LMVS – “least material virtual size”):** tamanho,  $l_{LMVS}$ , gerado pelo **efeito coletivo** (a diferença, para elementos exteriores, e a soma, para interiores) do tamanho de mínimo de matéria,  $l_{LMS}$ , de um elemento de tamanho e da tolerância geométrica (de forma, orientação ou posição),  $t_G$ , especificada para o seu elemento derivado (linha mediana ou superfície mediana), ver figura 8.27.

Para **elementos de tamanho exteriores:** 
$$l_{LMVS,e} = l_{LMS} - t_G \quad (8.3)$$

Para **elementos de tamanho interiores:** 
$$l_{LMVS,i} = l_{LMS} + t_G \quad (8.4)$$

**Condição virtual de mínimo de matéria (LMVC – “least material virtual condition”):** estado do **elemento associado** de tamanho virtual de mínimo de matéria,  $l_{LMVS}$ , (ver figura 8.27). A LMVC é uma condição de forma perfeita e pode incluir uma **restrição de posição** do elemento associado (figura 8.29 e 8.30).

**Requisito de mínimo de matéria (LMR – “least material requirement”):** requisito para um elemento de tamanho, que define um elemento geométrico do mesmo tipo e de forma perfeita, com um valor dado para a característica intrínseca (dimensão) igual ao LMVS, que limita o elemento não ideal pelo lado interior da matéria. **Os LMRs são utilizados aos pares para, por exemplo, controlar a “espessura mínima de parede”** entre dois elementos de tamanho semelhantes, posicionados simétrica ou coaxialmente. Aplica-se também a elementos de referência correlacionados.

**Requisito de reciprocidade (RPR – “reciprocity requirement”):** requisito suplementar para um elemento de tamanho, usado em complemento ao requisito de máximo de matéria (MMR) ou ao requisito de mínimo de matéria (LMR), para indicar que a tolerância dimensional é aumentada da diferença entre a tolerância geométrica e o desvio geométrico real.

### 8.3 Requisito de máximo de matéria (MMR)

O **requisito de máximo de matéria** pode ser especificado para um ou mais elementos de tamanho, do tipo “cilindro” ou do tipo “duas superfícies planas paralelas opostas”, mas não pode ser indicado para uma superfície plana ou para uma linha numa superfície. Pode ser aplicado quando há uma relação funcional entre tamanho e forma, tamanho e orientação ou tamanho e posição, que permita que o desvio geométrico possa ser maior do que o especificado, se o desvio do tamanho for inferior. **Aplica-se normalmente a ajustamentos com folga.** Não é apropriado para ajustamentos incertos ou com aperto, uma vez que o aumento da tolerância geométrica (quando a tolerância de tamanho não é totalmente utilizada) pode ter um efeito nocivo para a função da peça [H1].

**A folga mínima de montagem** ocorre quando cada um dos elementos de tamanho conjugados está no seu tamanho de máximo de matéria (p. ex. parafuso com tamanho máximo e furo de tamanho mínimo) e os desvios geométricos (p. ex. desvios de forma, orientação e posição) dos elementos e seus elementos derivados (linha mediana ou superfície mediana) estão também no seu máximo. **A folga de montagem atinge um máximo** quando os tamanhos dos elementos conjugados estão no seu mínimo de matéria (p. ex. tamanho mínimo do veio e tamanho máximo do furo) e os desvios geométricos (p. ex. desvios de forma, orientação e posição) dos elementos e seus elementos derivados são nulos. Daí resulta que, se os tamanhos de uma das peças conjugadas não atingirem o seu tamanho de máximo de matéria, a tolerância geométrica indicada para os elementos de tamanho e seus elementos derivados poderá ser aumentada sem comprometer a montagem com a outra peça.

O **requisito de máximo de matéria para elementos toleranciados** traduz-se em quatro requisitos independentes (ISO 2692):

- a) um requisito para o limite superior do tamanho local (**Regra A**);
- b) um requisito para o limite inferior do tamanho local (**Regra B**);
- c) um requisito de não violação da superfície da condição virtual de máximo de matéria (**Regra C**);
- d) um requisito para quando estão envolvidos mais do que um elemento (**Regra D**).

Quando o requisito de máximo de matéria (MMR) se aplica ao elemento toleranciado, tal deve ser indicado, nos desenhos, através do símbolo modificador  $\textcircled{M}$  colocado, no indicador de tolerância, após a tolerância geométrica do elemento derivado do elemento de tamanho (elemento toleranciado). Neste caso, o requisito especifica as seguintes **regras** para a(s) superfície(s) do elemento de tamanho:

**Regra A** – Os tamanhos locais extraídos do elemento toleranciado (ver figura 8.2) devem ser:

- 1) Menores ou iguais ao tamanho de máximo de matéria (MMS), para elementos exteriores.
- 2) Maiores ou iguais ao tamanho de máximo de matéria (MMS), para elementos interiores.

Esta regra pode ser alterada pela indicação do requisito de reciprocidade, através do símbolo  $\textcircled{R}$ , após o símbolo  $\textcircled{M}$ .

**Regra B** – Os tamanhos locais extraídos do elemento toleranciado (ver figura 8.2) devem ser:

- 1) Maiores ou iguais ao tamanho de mínimo de matéria (LMS), para elementos exteriores.
- 2) Menores ou iguais ao tamanho de mínimo de matéria (LMS), para elementos interiores.

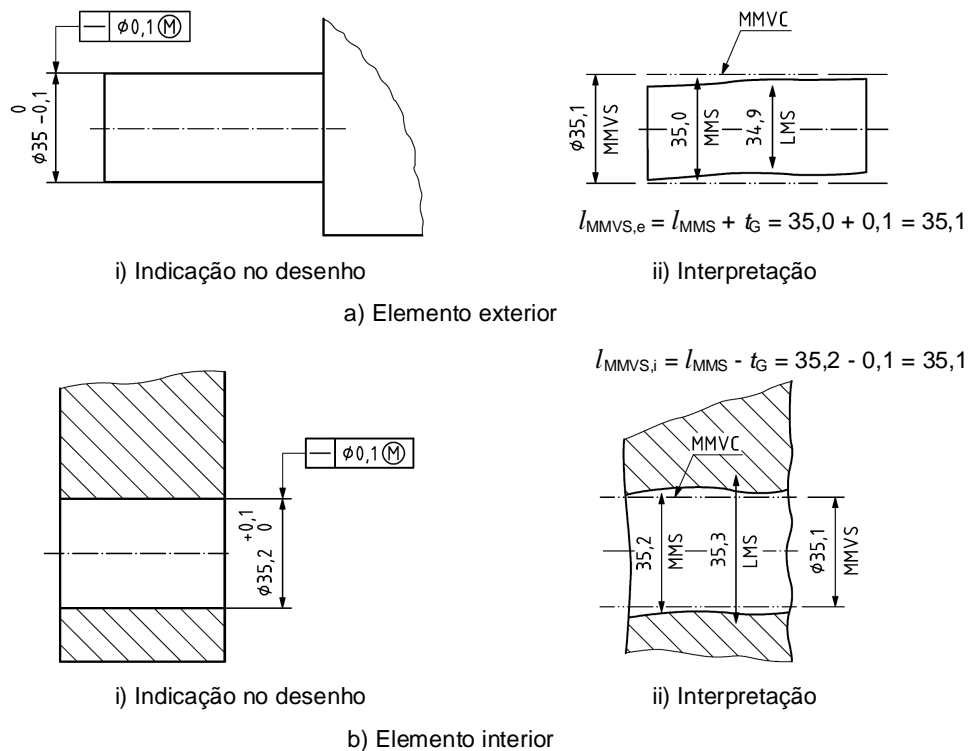


Figura 8.2 – Exemplos de aplicação do requisito de máximo de matéria em elementos toleranciados, baseados em requisitos de tamanho e de forma (retitude). Adaptada da ISO 2692

**Regra C** – A condição virtual de máximo de matéria (MMVC) do elemento de tamanho toleranciado (ver figura 8.2) não deve ser violada pelo elemento (integral) extraído.

A utilização do requisito de envolvente  $\textcircled{E}$ , pode dar origem a requisitos supérfluos, tendo em conta a função prevista para o(s) elemento(s) (“aptidão para a montagem”). A utilização de tais restrições e definições de tamanho reduz as vantagens técnicas e económicas do requisito de máximo de matéria (MMR).

A indicação **0** (M), aplicada numa tolerância geométrica de forma, tem o mesmo significado que o requisito de envolvente (E) aplicado na especificação de um tamanho (ver figuras 8.19).

**Regra D** – Quando a especificação geométrica é uma tolerância de orientação ou de posição relativamente a uma referência especificada (primária) ou a um sistema de referências especificadas, a condição virtual de máximo de matéria (MMVC) do elemento toleranciado deve ter uma orientação ou uma posição teoricamente exata relativamente a essa referência especificada ou sistema de referências especificadas (ver figura 8.3). Além disso, no caso de vários elementos toleranciados serem controlados pela mesma indicação de tolerância, as condições virtuais de máximo de matéria (MMVCs) devem também ter orientações e posições teoricamente exatas, umas em relação às outras, para além das possíveis restrições em relação à(s) referência(s) especificada(s), ver figuras 8.4 e 8.7.

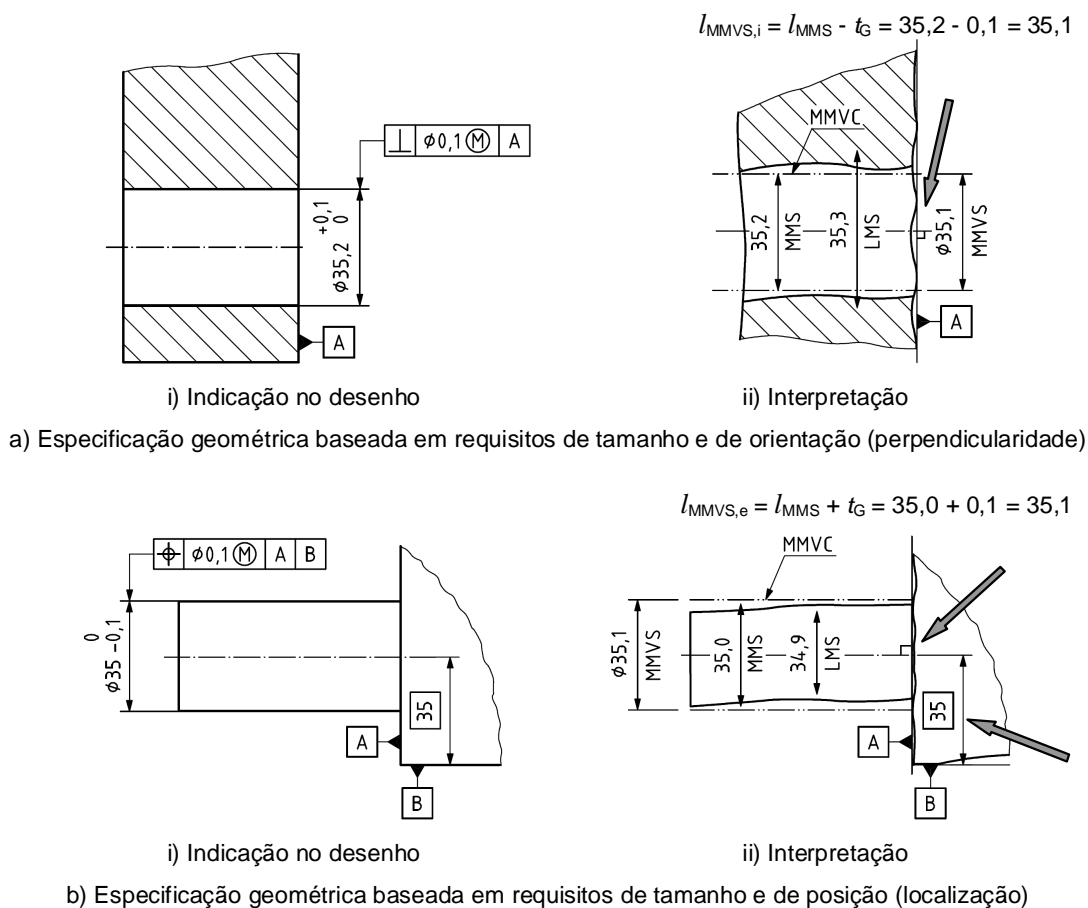


Figura 8.3 – Exemplos de aplicação do requisito de máximo de matéria a elementos toleranciados em relação a referências especificadas. Adaptada da ISO 2692

No caso de vários elementos toleranciados controlados pela mesma indicação de tolerância, o requisito de máximo de matéria (MMR), sem qualquer outro modificador para além do **(M)**, tem o mesmo significado do requisito resultante da indicação simultânea dos modificadores **CZ (M)** (ver o ISO/DIS 5458, o ponto 2 da secção 7.4.1.2.1 e as figuras 8.4 e 8.7 deste texto). Para especificar requisitos que devem ser aplicados em separado, deve utilizar-se o modificador **SZ** antes de **(M)**.



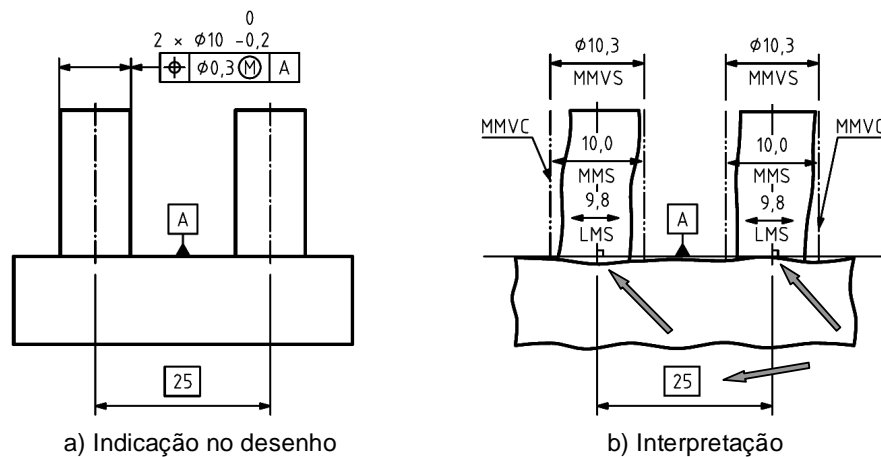


Figura 8.4 – Exemplo de aplicação do requisito de máximo de matéria, baseado em requisitos de tamanho e de posição (localização), a dois elementos cilíndricos toleranciados entre si e em relação a uma referência especificada. Adaptada da ISO 2692

Por sua vez, o **requisito de máximo de matéria para elementos de referência** traduz-se em três requisitos independentes (ISO 2692):

- um requisito de não violação da superfície da condição virtual de máximo de matéria (**Regra E**);
- um requisito para o tamanho virtual de máximo de matéria (MMVS), quando não existe qualquer especificação geométrica ou quando existem apenas especificações geométricas cujo valor da tolerância não é seguido pelo símbolo  $\textcircled{M}$  (**Regra F**);
- um requisito para o tamanho virtual de máximo de matéria (MMVS), quando existe uma especificação geométrica com um valor de tolerância seguido pelo símbolo  $\textcircled{M}$  e cuja secção de “referências especificadas” do indicador de tolerância satisfaz uma propriedade definida na **Regra G**.

Quando o requisito de máximo de matéria (MMR) se aplica ao elemento de referência, tal deve ser indicado, nos desenhos, através do símbolo  $\textcircled{M}$  colocado, no indicador de tolerância, após a(s) letra(s) que designam a referência especificada. A utilização do símbolo  $\textcircled{M}$  após a letra que designa a referência especificada só é possível se esta última for obtida a partir de um elemento de tamanho (ver figura 8.5).

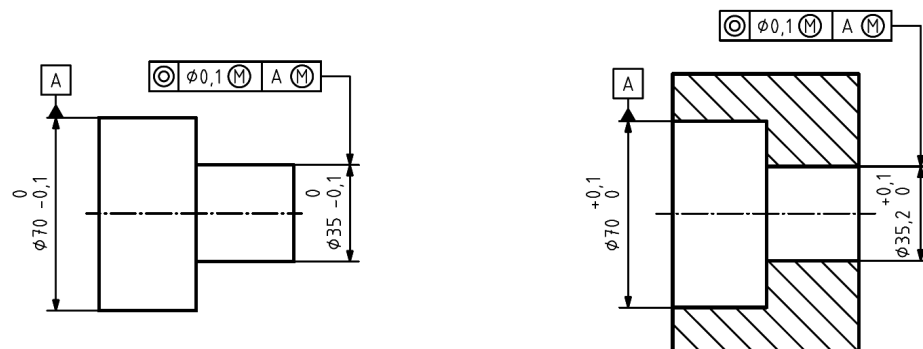


Figura 8.5 – Exemplos de aplicação do requisito de máximo de matéria, baseados em requisitos de tamanho e de posição (coaxialidade), a referências especificadas obtidas a partir de elementos de tamanho. Adaptada da ISO 2692

Se o requisito de máximo de matéria se aplicar a todos os elementos da coleção de superfícies de uma **referência especificada comum**, a correspondente sequência de letras, que identificam essa referência especificada comum, é indicada entre parêntesis [ver figuras 8.6 a) e 8.7] e as condições virtuais de máximo de matéria (MMVCs) são, por omissão, restringidas em orientação e posição, umas relativamente às outras. Quando o requisito de máximo de matéria se aplica apenas a um elemento da coleção de superfícies de uma referência especificada comum, a sequência de letras que identifica essa referência especificada comum não é indicada entre parêntesis e o requisito aplica-se apenas ao elemento identificado pela letra colocada imediatamente antes do símbolo  $\textcircled{M}$ , ver figura 8.6 b).



Figura 8.6 – Exemplos de aplicação do requisito de máximo de matéria a elementos da coleção de superfícies de diferentes referências especificadas comuns

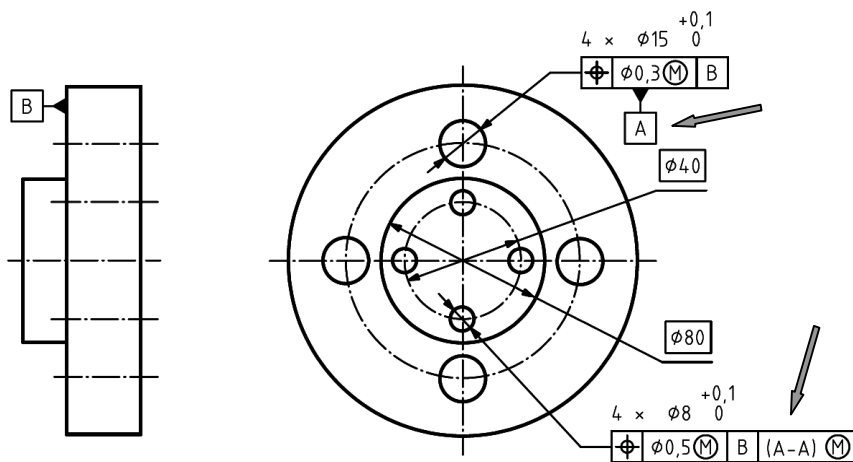


Figura 8.7 – Exemplo de aplicação do requisito de máximo de matéria, baseado em requisitos de tamanho e de posição (localização), a uma referência especificada comum. Adaptada da ISO 2692

No caso de **elementos de referência**, este requisito especifica as seguintes **regras** para a(s) superfície(s) do elemento de tamanho:

**Regra E** – A condição virtual de máximo de matéria (MMVC) do elemento de referência considerado não deve ser violada pelo elemento de referência (integral) extraído, a partir do qual foi derivada a referência especificada (ver figuras 8.8 e 8.9).

**Regra F** – O tamanho da condição virtual de máximo de matéria (MMVC), do elemento de referência considerado, deve ser igual ao tamanho de máximo de matéria (MMS), quando o elemento de referência considerado não está sujeito a qualquer especificação geométrica (ver figura 8.8), tem apenas especificações geométricas cujo valor da tolerância não é seguido do símbolo  $\textcircled{M}$  ou não tem qualquer especificação geométrica que respeite a **regra G**.

Nestes casos, o MMVS para elementos de tamanho exteriores e interiores,  $l_{MMVS}$ , é dado por:

$$l_{MMVS} = l_{MMS} \pm 0 = l_{MMS} \quad (8.5)$$

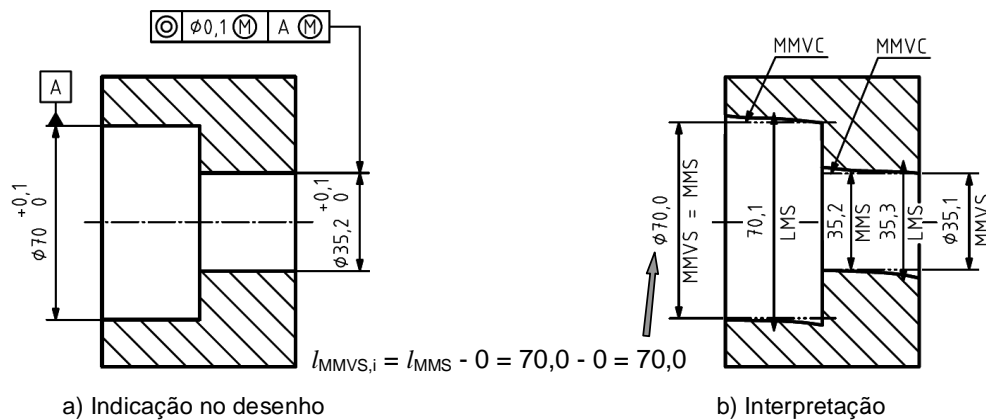


Figura 8.8 – Exemplo de aplicação do requisito de máximo de matéria a um elemento cilíndrico interior toleranciado, baseado em requisitos de tamanho e de posição (coaxialidade), e ao eixo de um elemento cilíndrico, com um requisito de tamanho, utilizado como referência especificada. Adaptada da ISO 2692

**Regra G** – O tamanho da condição virtual de máximo de matéria (MMVC),  $l_{MMVS}$ , do elemento de referência considerado deve ser igual ao tamanho de máximo de matéria (MMS),  $l_{MMS}$ , mais (para elementos de tamanho exteriores) ou menos (para elementos de tamanho interiores) a tolerância geométrica,  $t_G$ , quando o elemento de referência é controlado por uma especificação geométrica com as seguintes propriedades:

- 1) o valor da sua tolerância é seguido do símbolo  $\textcircled{M}$ , e
- 2) é uma especificação de forma, sendo a referência especificada correlacionada correspondente à referência especificada primária do indicador de tolerância, em que o símbolo  $\textcircled{M}$  está indicado após a letra que identifica a referência especificada (ver figura 8.9), ou

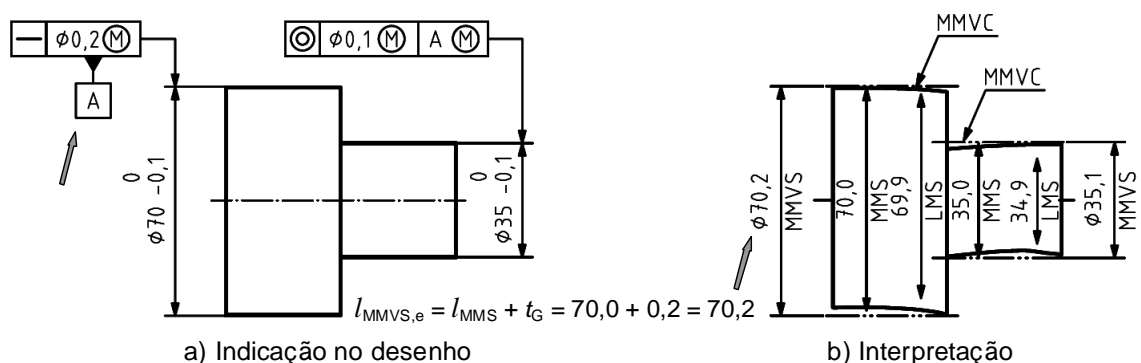


Figura 8.9 – Exemplo de aplicação do requisito de máximo de matéria a um elemento cilíndrico toleranciado, baseado em requisitos de tamanho e de posição (coaxialidade), e ao eixo de um elemento cilíndrico exterior, com requisitos de tamanho e de forma (retitude), utilizado como referência especificada. Adaptada da ISO 2692

- 3) é uma especificação de orientação/posição cuja referência especificada ou sistema de referências especificadas contém exatamente a(s) mesma(s) referência(s) especificada(s), pela mesma ordem que foram indicadas antes da referência correlacionada no indicador de

tolerância, em que o símbolo **M** está indicado após a letra que identifica a referência especificada (ver figuras 8.7 e 8.10).

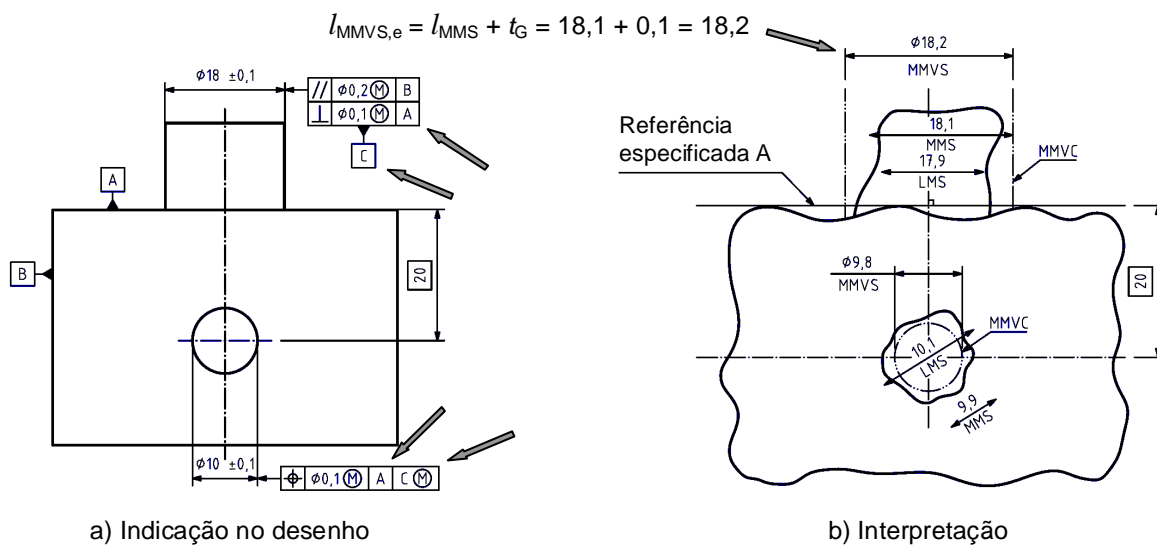


Figura 8.10 – Exemplo de aplicação do requisito de máximo de matéria a um elemento cilíndrico interior toleranciado e a um elemento de referência C controlado por uma especificação de orientação (perpendicularidade) cujo valor da tolerância é seguido do símbolo (M) e cuja referência especificada A corresponde exatamente à referência indicada antes da referência especificada C considerada. Adaptada da ISO 2692

Neste caso, o tamanho virtual de máximo de matéria (MMVS), para elementos de tamanho exteriores, é calculado pela expressão 8.1 e, para elementos de tamanho interiores, é determinado pela expressão 8.2. Quando as propriedades atrás indicadas não se verificam, aplica-se a **regra F**.

Com a **regra G**, o indicador do elemento de referência deve ser ligado diretamente ao indicador de tolerância geométrica, a partir do qual é controlada a condição virtual de máximo de matéria (MMVC) do elemento de referência (ver figuras 8.9 e 8.10).

Na generalidade dos desenhos industriais, a maioria das tolerâncias geométricas, especificadas em conformidade com o **requisito de máximo de matéria (MMR)**, apresenta valores não nulos (ver exemplos das figuras 8.1 a 8.10). Tal facto pode resultar de terem sido formuladas hipóteses de distribuição das tolerâncias totais entre os tamanhos e as características geométricas ou, então, as distribuições adotadas derivaram de resultados obtidos através de ensaios experimentais prévios.

Frequentemente, a tolerância geométrica especificada, no desenho, tem em conta o desvio de fabricação esperado, uma vez que se conhecem as características do processo de fabricação a adotar. A introdução adicional do requisito do máximo de matéria, através da inscrição do símbolo modificador  $\textcircled{M}$ , induz um acréscimo de liberdade em termos da fabricação e do controlo, relativamente à consideração estrita da repartição de tolerâncias previamente estabelecida [H3]. No entanto, este procedimento tem uma correlação com a função inferior à que resultaria da especificação de uma tolerância 0  $\textcircled{M}$  (ver secção 8.3.2).

**No controlo da produção** de peças submetidas a especificações em conformidade com o requisito do máximo de matéria, apenas é necessário **verificar a não violação da condição virtual de máximo de matéria** do(s) elemento(s) toleranciado(s) e, se apropriado, do(s) elemento(s) de referência, não sendo preciso efetuar cálculos com valores medidos da tolerância geométrica e dos tamanhos dos elementos (ver secção 8.3.1).

Complementarmente, **os tamanhos locais extraídos** dos elementos toleranciados e, se apropriado, do(s) elemento(s) de referência devem respeitar os limites estabelecidos pelos respetivos tamanhos de máximo de matéria (MMS) e de mínimo de matéria (LMS), ver regras A e B.

Noutros casos, as tolerâncias geométricas, especificadas com o requisito de máxima de matéria, apresentam valores diferentes de zero, porque são o resultado de modificações ou de transposições de cotagens pré-existentes. A maioria dos exemplos apresentados na atual norma ISO 2692 parece ser o resultado da utilização de um procedimento análogo [S1]. Com efeito, o símbolo modificador de máximo de matéria pode ser adicionado a uma cotação pré-existente, com baixa probabilidade de tal vir a causar problemas (quando há uma relação efetiva entre tamanho e tolerância geométrica) e sem se ter de voltar a efetuar o estudo funcional do mecanismo.

**Para a formulação das hipóteses de distribuição das tolerâncias totais** entre os tamanhos e as características geométricas dos elementos de peças conjugadas, os exemplos apresentados na norma ISO 2692 e os conceitos expressos no Apêndice B da norma ASME Y14.5 assumem que **os elementos considerados são de forma perfeita e estão na sua condição de máximo de matéria, de modo que a folga mínima registada entre eles possa acomodar as tolerâncias geométricas a especificar**. Logo, quando se pretende efetuar uma distribuição de tolerâncias, devem admitir-se estas hipóteses de base, que poderão ter de ser complementadas por condições geométricas adicionais, necessárias para a satisfação das funções previstas para os elementos conjugados.

A título de exemplo, na figura 8.11, apresenta-se uma aplicação do requisito de máximo de matéria em dois elementos cilíndricos toleranciados (“veio” e “furo”), baseado em requisitos de tamanho e de posição (localização).

A função pretendida para as peças toleranciadas, “veio” e “furo”, poderá ser a sua montagem conjunta, em que, de acordo com o requisito funcional, a ponta de veio deve ajustar-se no furo, os dois elementos de referência primária A (faces planas) devem ficar em contacto e os dois elementos de referência secundária B (faces planas), perpendiculares aos primeiros, devem também contactar entre si. A orientação da condição virtual de máximo de matéria (MMVC) de cada um dos elementos toleranciados é perpendicular à referência especificada A, e a sua posição está a uma distância teoricamente exata de 35 mm em relação à referência especificada B (ver regra D).

As condições de montagem mais desfavoráveis surgem quando se admite que os elementos a montar são de forma perfeita, estão na sua condição de máximo de matéria e os desvios geométricos

dos seus elementos derivados são também máximos. Assim, em termos de tamanhos, a folga mínima pode ser determinada através da expressão:

$$F_{\min} = D_{\min} - d_{\max} = \varnothing 35,2 - \varnothing 35,0 = 0,2 \quad (8.6)$$

Por sua vez, a soma dos desvios de localização máximos deve poder ser acomodada por esta folga mínima, pelo que a soma das respectivas tolerâncias de localização pode ser expressa como:

$$t_{\phi_e} + t_{\phi_i} = F_{\min} = 0,2 \quad (8.7)$$

Admitindo uma repartição igual do valor da folga  $F_{\min}$ , pelas tolerâncias de localização de cada uma das peças, tendo em conta os métodos de fabricação previstos, obtém-se:

$$t_{\phi_e} = t_{\phi_i} = F_{\min} / 2 = 0,2 / 2 = \varnothing 0,1 \quad (8.8)$$

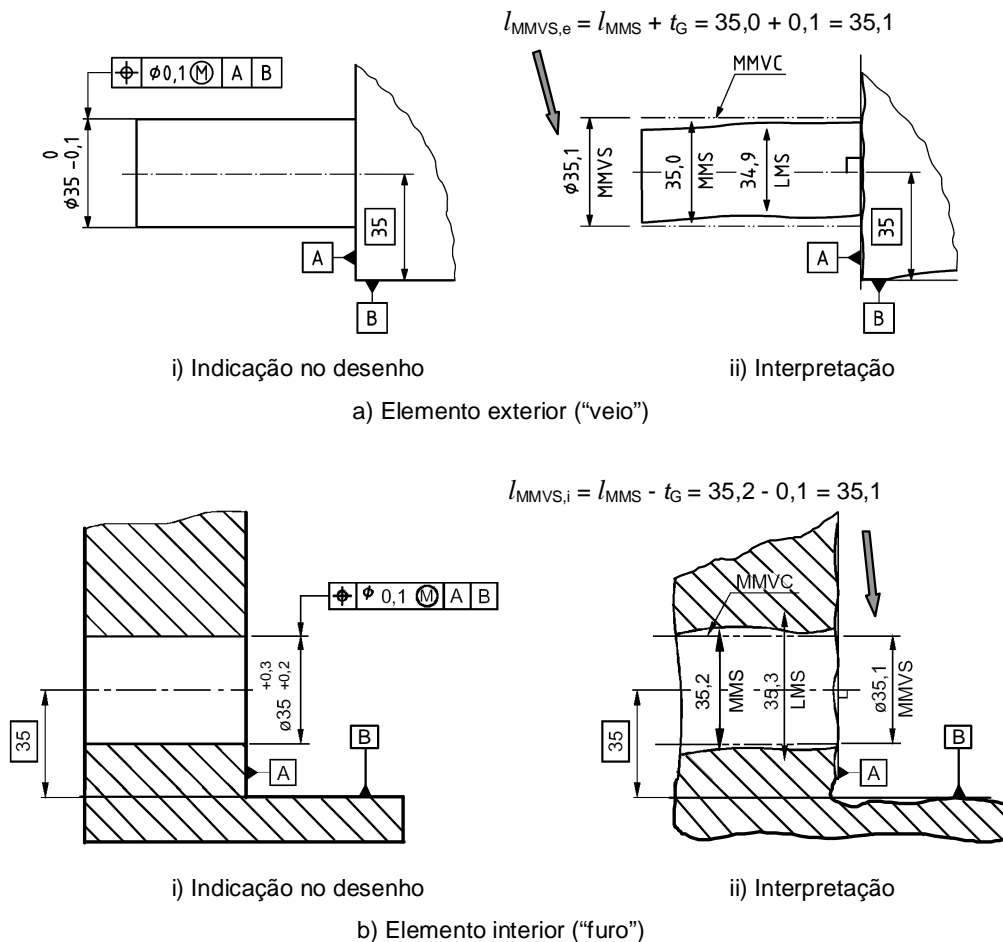


Figura 8.11 – Exemplo de aplicação do requisito de máximo de matéria em dois elementos cilíndricos toleranciados, baseado em requisitos de tamanho e de posição (localização). Adaptada da ISO 2692

A análise das figuras 8.11 a) e 8.11 b) permite verificar que o procedimento de cálculo adotado deu origem a que os elementos toleranciados de ambas as peças tenham uma condição virtual de máximo de matéria (MMVC), com o mesmo tamanho  $l_{MMVS,e} = l_{MMVS,i} = \varnothing 35,1$ , que não deve ser violada pelo correspondente elemento (integral) extraído (ver regra C).

Com uma repartição diferente de valores pelas tolerâncias de localização de cada uma das peças, em função das necessidades de fabricação, estas manteriam uma condição virtual de máximo de matéria (MMVC) igual, mas o valor do seu respetivo tamanho (MMVS) seria diferente do atrás obtido.

Adicionalmente, os tamanhos locais extraídos dos elementos toleranciados devem respeitar os limites estabelecidos pelos respetivos tamanhos de máximo de matéria (MMS) e de mínimo de matéria (LMS), ver regras A e B.

Na figura 8.12, apresenta-se outro exemplo em que o requisito de máximo de matéria é agora aplicado em dois elementos cilíndricos toleranciados (“veio” e “furo”), baseado em requisitos de tamanho e de posição (coaxialidade), e também nos eixos de elementos cilíndricos utilizados como referências especificadas, baseado em requisitos de tamanho e de forma (retitude).

A função pretendida para as peças toleranciadas, “veio” e “furo”, poderá ser a sua montagem conjunta, com o acoplamento simultâneo dos seus dois tramos cilíndricos Ø35 e Ø70. A posição da condição virtual de máximo de matéria (MMVC) do elemento tolerenciado é coaxial (0 mm) com o eixo da condição virtual de máximo de matéria (MMVC) do elemento de referência A (ver regra D).

As condições de montagem mais desfavoráveis surgem quando se admite que os elementos toleranciados a montar são de forma perfeita, estão na sua condição de máximo de matéria e os desvios geométricos dos seus elementos derivados são também máximos, ao mesmo tempo que os tamanhos de montagem dos elementos de referência são iguais aos tamanhos das respetivas condições virtuais de máximo de matéria (MMVC). Assim, em termos de tamanhos dos elementos toleranciados, a folga mínima pode ser determinada através da expressão:

$$F_{\min} = D_{\min} - d_{\max} = \text{Ø}35,2 - \text{Ø}35,0 = 0,2 \quad (8.9)$$

Por outro lado, analisando a figura 8.12, constata-se que os elementos de referência de ambas as peças apresentam uma condição virtual de máximo de matéria (MMVC), com o mesmo tamanho  $l_{\text{MMVS,e}} = l_{\text{MMVS,i}} = \text{Ø}70,2$ .

A soma dos desvios de coaxialidade máximos deve poder ser acomodada por aquela folga mínima, pelo que a soma das respetivas tolerâncias de coaxialidade pode ser expressa como:

$$t_{\odot e} + t_{\odot i} = F_{\min} = 0,2 \quad (8.10)$$

Admitindo uma repartição igual do valor da folga  $F_{\min}$ , pelas tolerâncias de coaxialidade de cada uma das peças, tendo em conta os métodos de fabricação previstos, obtém-se:

$$t_{\odot e} = t_{\odot i} = F_{\min} / 2 = 0,2 / 2 = \text{Ø}0,1 \quad (8.11)$$

A observação das figuras 8.12 a) e 8.12 b) permite verificar que o procedimento de cálculo adotado deu origem a que os elementos toleranciados de ambas as peças apresentem uma condição virtual de máximo de matéria (MMVC), com o mesmo tamanho  $l_{\text{MMVS,e}} = l_{\text{MMVS,i}} = \text{Ø}35,1$ , que não deve ser violada pelo correspondente elemento (integral) extraído (ver regra C).

Com uma repartição diferente de valores pelas tolerâncias de coaxialidade de cada uma das peças, em função das necessidades de fabricação, estas manteriam uma condição virtual de máximo de matéria (MMVC) igual, mas o valor do seu respetivo tamanho (MMVS) seria diferente do atrás obtido.

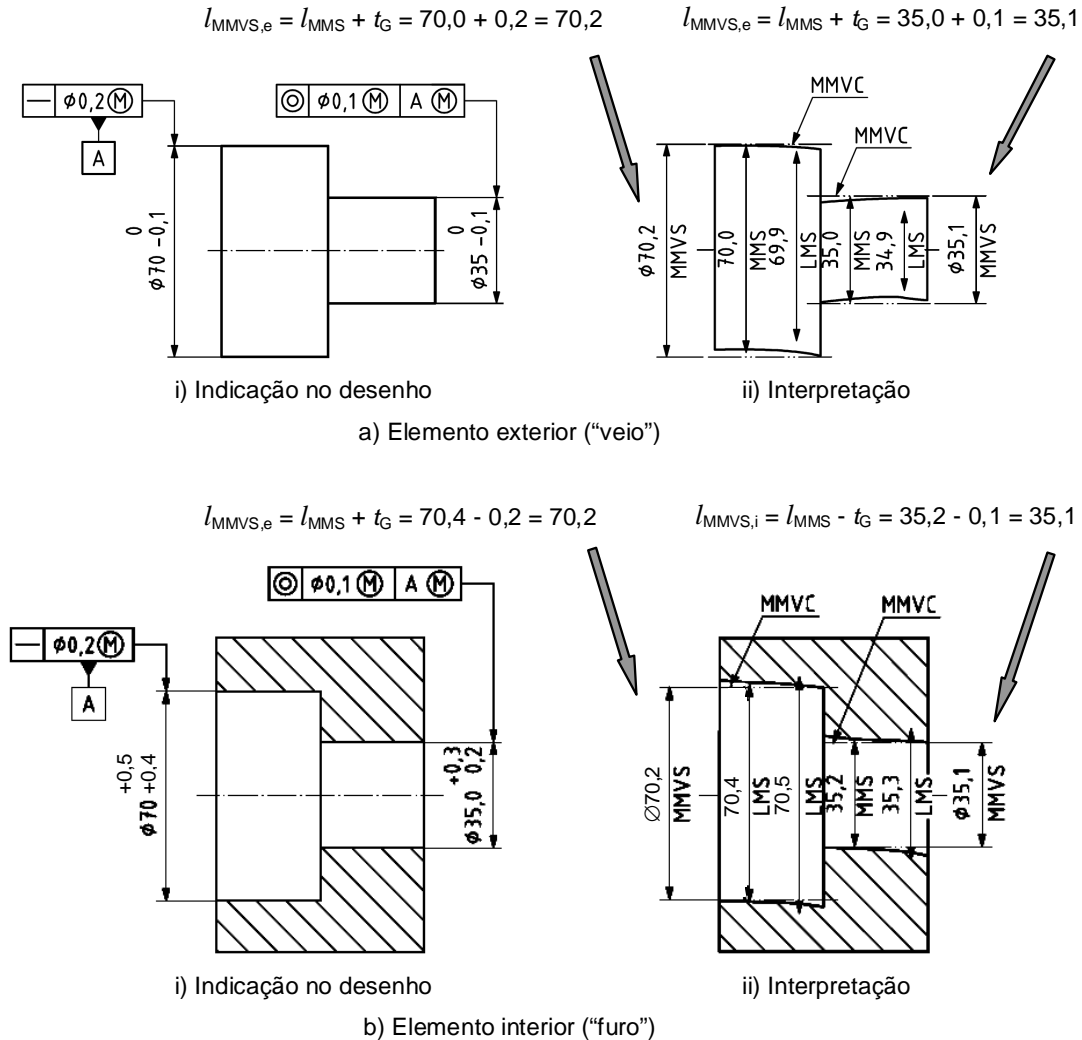


Figura 8.12 – Exemplo de aplicação do requisito de máximo de matéria em dois elementos cilíndricos toleranciados, baseado em requisitos de tamanho e de posição (coaxialidade), e também nos eixos de elementos cilíndricos utilizados como referências especificadas, baseado em requisitos de tamanho e de forma (retitude). Adaptada da ISO 2692

Por seu turno, com a aplicação do requisito de máximo de matéria ao elemento de referência de cada uma destas peças cilíndricas, o eixo de referência extraído poderá variar em relação ao elemento tolerenciado, se existir um desvio em relação ao tamanho virtual de máximo de matéria do elemento de referência. O valor dessa variação é igual à diferença entre o tamanho de montagem do elemento de referência e o seu tamanho virtual de máximo de matéria. Quando, existe uma correlação apenas entre dois elementos, como a que se regista em cada uma das duas peças deste exemplo, aquela variação dá origem a um alargamento da tolerância de cada um dos dois elementos toleranciados [H1].

Adicionalmente, os tamanhos locais extraídos dos elementos toleranciados e dos elementos de referência devem respeitar os limites estabelecidos pelos respetivos tamanhos de máximo de matéria (MMS) e de mínimo de matéria (LMS), ver regras A e B.



Assim, no controlo de uma especificação geométrica, baseada no **requisito de máximo de matéria (MMR)**, deve efetuar-se uma verificação da não violação da(s) condição(ões) virtual(ais) de máximo de matéria, por intermédio de um **calibre funcional** (ver secção 8.3.1), complementada pela medição/verificação dos vários tamanhos locais extraídos, avaliados enquanto tamanhos entre dois pontos.

Os conceitos atrás expostos permitem constatar que a “montagem de peças” depende do efeito combinado do(s) tamanho(s) do(s) elemento(s) extraído(s) e do(s) desvio(s) geométrico(s) dos seu(s) elemento(s) derivados, de cada uma das peças conjugadas. Se o(s) tamanho(s) do(s) elemento(s) de uma das peças da montagem não atingir(em) o seu valor de máximo de matéria, a tolerância geométrica indicada para o(s) seu(s) elemento(s) derivado(s) poderá ser excedida, sem pôr em perigo a sua montagem com a outra peça [H3].

### 8.3.1 Verificação do requisito de máximo de matéria

A aptidão funcional de peças, com elemento(s) de tamanho toleranciado(s) em conformidade com o requisito de máximo de matéria (MMR), pode ser verificada com o auxílio de **calibres funcionais** (“*functional gauges*”), estabelecidos a partir do conceito de “condição virtual de máximo de matéria” (MMVC). Esses calibres podem ser físicos, no âmbito de uma metrologia convencional baseada em instrumentos de medição (“*hard gauging*”), ou virtuais, em termos de uma metrologia digital computadorizada.

A **condição virtual de máximo de matéria (MMVC)**, no(s) elemento(s) toleranciado(s) e no(s) elemento(s) de referência, descreve os tamanhos, as formas, as orientações e as posições nominais das superfícies do calibre. No caso de uma peça, submetida a verificação, se ajustar adequadamente a um calibre que simula a peça conjugada mais desfavorável, pode concluir-se que a sua montagem será possível com qualquer uma das peças reais que com ela venham a ser conjugadas [H1]. Os tamanhos virtuais de máximo de matéria,  $I_{MMVS}$ , determinados através das expressões (8.1), para elementos exteriores, e (8.2), para elementos interiores, são as dimensões nominais de conceção do calibre funcional.

Um calibre funcional é um instrumento de verificação que permite avaliar a relação existente entre tamanho e forma, tamanho e orientação ou tamanho e posição. Uma peça, em que o efeito combinado do tamanho e dos desvios geométricos do elemento toleranciado e, se aplicável, do elemento de referência leve à violação da(s) respetiva(s) condição(ões) virtual(ais) de máximo de matéria, será rejeitada quando verificada por meio de um calibre funcional.

Quando um requisito de máximo de matéria é verificado por outros meios (p. ex. através de uma máquina de medição de coordenadas), o requisito deverá ser controlado de modo que, quando considerado aprovado, pudesse também ser aceite, caso fosse verificado com um calibre funcional.

Na figura 8.13 a), a título de exemplo, apresenta-se o desenho de uma placa com um grupo (configuração) de quatro furos Ø8, que estão sujeitos a uma tolerância dimensional e a uma tolerância geométrica de localização entre si e em relação ao plano de referência A, com a aplicação do requisito de máximo de matéria (M) aos elementos toleranciados.

Os diâmetros dos furos, verificados como tamanhos locais entre dois pontos, devem respeitar os limites estabelecidos no desenho, podendo variar entre Ø8,1 e Ø8,2. Por sua vez, o requisito de localização pode ser verificado por intermédio de um calibre funcional com quatro pinos que simulam as condições virtuais de máximo de matéria de cada furo, ver figura 8.13 b), e penetram simultaneamente nos quatro furos da placa. Os pinos estão localizados de acordo com as posições teoricamente exatas dos furos na placa, a sua orientação deve ser perpendicular à superfície do calibre que encosta no elemento de referência A da placa e o seu diâmetro deve ser igual ao tamanho virtual,  $I_{MMVS,i} = I_{MMS} - t_G = (8,1 - 0,1) = \text{Ø}8$ .

Esta placa com quatro furos pode ter sido concebida para ser montada em conjunto com a placa representada na figura 8.14 a).

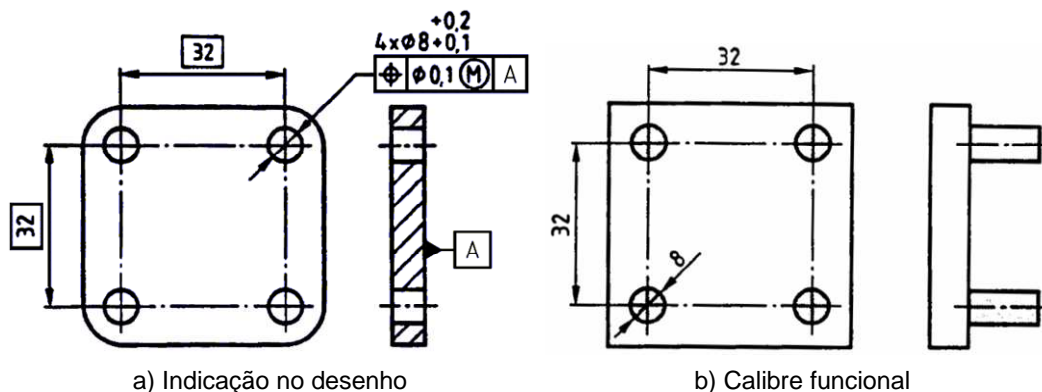


Figura 8.13 – Especificação de uma tolerância de localização de quatro furos, uns em relação aos outros e em relação ao plano de referência A, com a aplicação do requisito de máximo de matéria

O desenho da figura 8.14 a) diz respeito a uma placa com um grupo (configuração) de quatro pinos Ø8, que estão sujeitos a uma tolerância dimensional e a uma tolerância geométrica de localização entre si e em relação ao plano de referência A, com a aplicação do requisito de máximo de matéria (M) aos elementos toleranciados.

Os diâmetros dos pinos, verificados como tamanhos locais entre dois pontos, devem respeitar os limites estabelecidos no desenho, podendo variar entre Ø7,8 e Ø7,9. Por sua vez, o requisito de localização pode ser verificado por intermédio de um calibre funcional com quatro furos que simulam as condições virtuais de máximo de matéria de cada pino, ver figura 8.14 b), e alojam em simultâneo os quatro pinos da placa. Os furos estão localizados de acordo com as posições teoricamente exatas dos pinos na placa, a sua orientação deve ser perpendicular à superfície do calibre que encosta no elemento de referência A da placa e o seu diâmetro deve ser igual ao tamanho virtual de máximo de matéria,  $I_{MMVS,e} = I_{MMS} + t_G = (7,9 + 0,1) = \text{Ø}8$ .

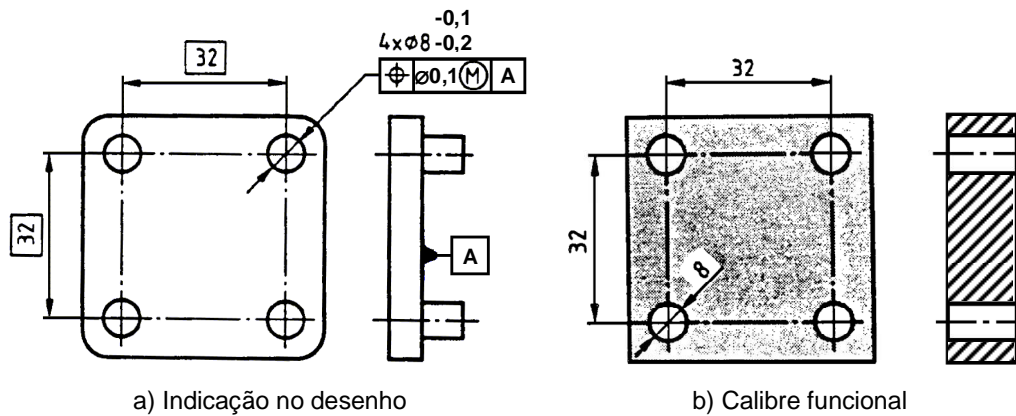


Figura 8.14 – Especificação de uma tolerância de localização de quatro pinos, uns em relação aos outros e em relação ao plano de referência A, com a aplicação do requisito de máximo de matéria

Atendendo a que os calibres funcionais definidos para a verificação das duas peças atrás analisadas, ver figuras 8.13 b) e 8.14 b), materializam condições virtuais de máximo de matéria com o mesmo tamanho,  $l_{MMVS,i} = l_{MMVS,e} = \varnothing 8$ , pode concluir-se que as especificações indicadas são adequadas para assegurarem a funcionalidade pretendida para as peças.

Finalmente, na figura 8.15 a), pode observar-se o desenho de uma peça com dois tramos cilíndricos sujeitos a tolerâncias dimensionais e a uma tolerância geométrica de coaxialidade do tramo mais pequeno em relação ao tramo maior, com a aplicação simultânea do requisito de máximo de matéria  $\textcircled{M}$  ao elemento tolerenciado e ao elemento de referência.

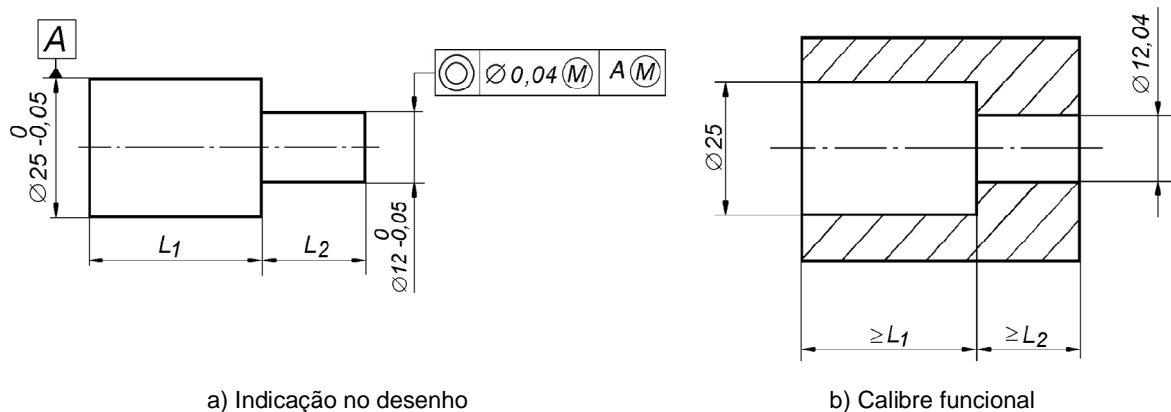


Figura 8.15 – Especificação de uma tolerância de coaxialidade entre dois elementos cilíndricos, com a aplicação simultânea do requisito de máximo de matéria ao elemento tolerenciado e ao elemento de referência. Adaptada da norma Volvo STD 112-0001

Os diâmetros dos dois tramos cilíndricos, verificados como tamanhos locais entre dois pontos, devem respeitar os limites estabelecidos no desenho, de modo que os diâmetros do tramo mais pequeno possam variar entre  $\varnothing 11,95$  e  $\varnothing 12$  e os do tramo maior entre  $\varnothing 24,95$  e  $\varnothing 25$ . Por sua vez, o requisito de coaxialidade pode ser verificado por intermédio de um calibre funcional com dois furos coaxiais (0 mm) que simulam as condições virtuais de máximo de matéria de cada um dos tramos, ver figura 8.15 b). O tamanho da condição virtual de máximo de matéria do elemento tolerenciado pode

ser calculado através da expressão,  $I_{MMVS,e2} = I_{MMS} + t_G = (12,00 + 0,04) = \varnothing 12,04$ , enquanto o tamanho virtual do elemento de referência é dado por,  $I_{MMVS,e1} = I_{MMS} + 0 = (25 + 0) = \varnothing 25$ .

Na execução dos desenhos de definição de calibres funcionais, a especificação de tolerâncias para os tamanhos nominais, dos elementos que simulam as condições virtuais de máximo de matéria, pode ser efetuada tendo em consideração a norma ISO 1938-1 e as referências [M1 e G2].

Em resumo, o respeito da condição de conformidade de uma peça com uma especificação do requisito de máximo de matéria (MMR) requer que a(s) superfície(s) do(s) elemento(s) toleranciado(s) e, se necessário, a(s) superfície(s) do(s) elemento(s) de referência não violem a(s) envolvente(s) constituída(s) pela(s) sua(s) condição(ões) virtual(ais) de máximo de matéria. Os graus de liberdade da(s) envolvente(s) em relação ao(s) respetivos elemento(s) da peça real podem ser utilizados para garantir a observância dessa condição.

Esses graus de liberdade podem ser de magnitude ilimitada, se corresponderem aos graus de invariância das condições virtuais do elemento tolerenciado e do elemento de referência, ou podem ser de amplitude limitada.

Quando, por exemplo, o **elemento de referência** é especificado em conformidade com o requisito de máximo de matéria (MMR), o seu tamanho virtual (MMVS) será igual ao tamanho de máximo de matéria (MMS), se esse elemento não estiver sujeito a qualquer especificação geométrica que respeite a **regra G**. Logo, podem existir pequenos deslocamentos entre o elemento de referência associado (superfície do calibre) e o elemento de referência da peça real, que derivam do facto do tamanho de montagem do elemento de referência real ser diferente do tamanho virtual de máximo de matéria do elemento de referência associado [S1].

Na figura 8.16, apresentam-se exemplos de diferentes sistemas de referências especificadas, passíveis de serem inscritos no indicador de tolerância representado no desenho. Em termos da sua materialização por meio de um calibre funcional, com vista à verificação da tolerância geométrica especificada no desenho da peça, podem considerar-se os três casos seguintes:

No caso (a), a superfície de referência B deve contactar o calibre, em conformidade com o “requisito da oscilação mínima” (“*minimum rock requirement*” – ISO 5459:1981). O diâmetro do furo do calibre deve ser igual ao tamanho virtual de máximo de matéria do elemento de referência A.

No caso (b), o furo do calibre deve abarcar o elemento de referência A, com o diâmetro mínimo possível (tamanho de montagem do elemento de referência A). O elemento de referência é orientado em conformidade com o “requisito da oscilação mínima”. A superfície B contacta com o calibre apenas num ponto. No caso da tolerância de localização dos furos, tal facto não tem qualquer influência sobre a localização.

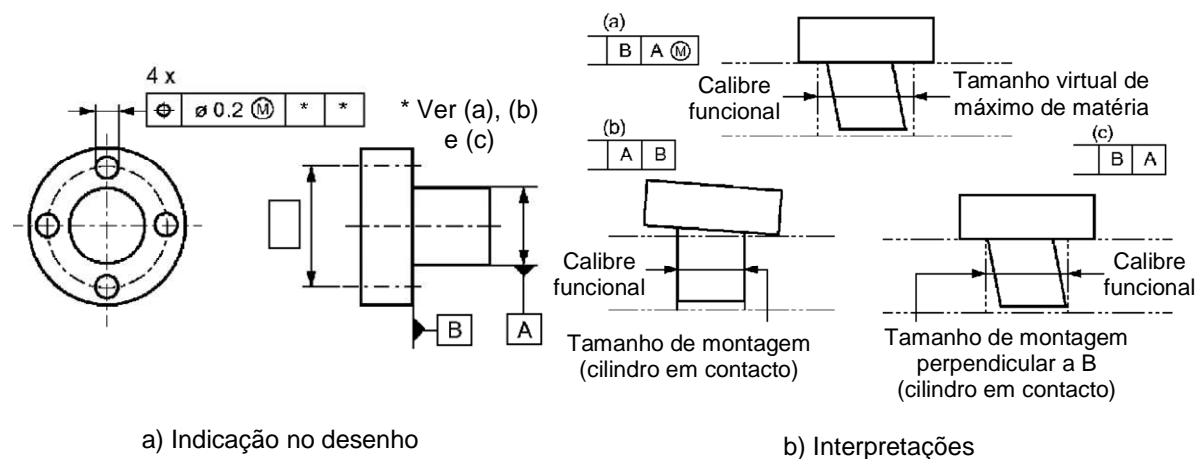


Figura 8.16 – Exemplo de especificação do requisito de máximo de matéria num elemento de referência e interpretação, em termos de controlo, de diferentes sistemas de referências especificadas inscritos no indicador de tolerância. Adaptada de [H1]

No caso (c), a superfície B deve contactar com o calibre em conformidade com o “requisito da oscilação mínima”. Com esta orientação, o furo do calibre deve englobar o elemento de referência A, com a diâmetro mínimo possível.

Os exemplos (a) e (c) da figura 8.16 permitem concluir que a indicação do requisito de máximo de matéria  $\text{M}$  numa referência especificada, inscrita num indicador de tolerância, provoca uma alteração do seu significado estabelecido na norma ISO 5459. Com a especificação do símbolo modificador  $\text{M}$ , o cilindro de referência poderá variar no interior da condição virtual de máximo de matéria (materializada pelo calibre). Sem a especificação de  $\text{M}$ , o cilindro de referência fica fixo.

### 8.3.2 O significado da especificação de uma tolerância geométrica zero

Num ajustamento H/h, quando cada um dos elementos de tamanho da montagem é considerado de forma perfeita e está no seu tamanho de máximo de matéria, a folga mínima é nula e a montagem só é possível se os desvios geométricos forem também nulos. Este facto obriga à especificação de uma tolerância geométrica zero na condição de máximo de matéria, 0  $\text{M}$ .

Nos exemplos apresentados nas figuras 8.13 e 8.14, a tolerância funcional foi repartida entre o tamanho e a localização. O caso extremo será atribuir toda a tolerância ao tamanho e indicar uma tolerância de localização zero. Nesse caso, a tolerância dimensional deverá ser aumentada, passando a ser igual à soma da tolerância dimensional com a tolerância de localização, anteriormente indicadas, de modo que o tamanho de máximo de matéria (MMS) passe a ser igual ao tamanho virtual de máximo de matéria (MMVS) (ver figura 8.17).

A especificação de uma tolerância geométrica zero na condição de máximo de matéria, para traduzir uma condição de montagem, é normalmente preferível, pois este modo de cotação e toleranciamento fornece, diretamente, os tamanhos nominais dos calibres funcionais. A escrita de

uma tolerância geométrica 0 (M) indica uma possibilidade de repartição aleatória entre uma tolerância de tamanho e uma tolerância geométrica, sem ter de formalizar essa relação antes do processo de fabricação [S1, B2].

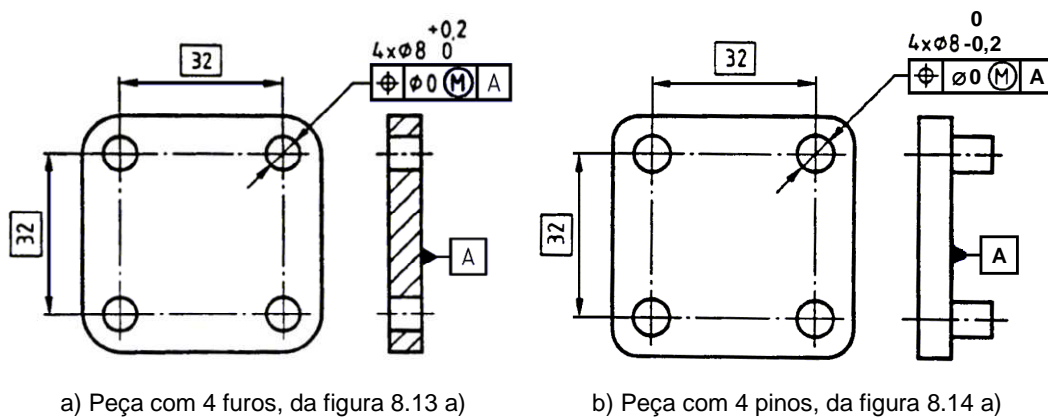
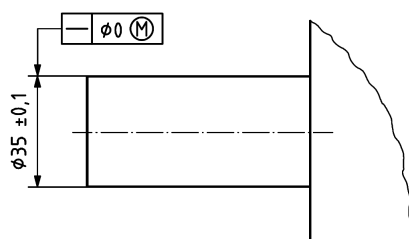


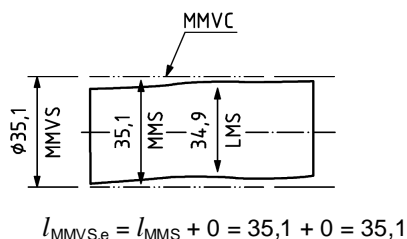
Figura 8.17 – Especificação de uma tolerância de localização 0 (M)

Este conceito pode ser melhor compreendido comparando os exemplos de cotação e toleranciamento apresentados na figura 8.18 com os representados na figura 8.2. Em ambos os casos, a função pretendida para as peças “veio” e “furo”, com comprimentos semelhantes, poderá ser o seu ajustamento com folga. Nos dois exemplos em análise, a orientação e a posição das condições virtuais de máximo de matéria (MMVCs) não são controladas por quaisquer restrições externas.

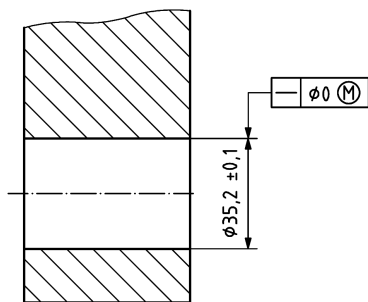


i) Indicação no desenho

a) Elemento exterior



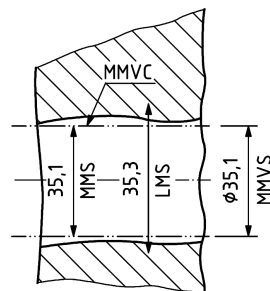
ii) Interpretação



i) Indicação no desenho

b) Elemento interior

$$l_{MMVS,i} = l_{MMS} - 0 = 35,1 - 0 = 35,1$$



ii) Interpretação

Figura 8.18 – Exemplos de aplicação do requisito de máximo de matéria (com 0 (M)) em elementos toleranciados, baseados em requisitos de tamanho e de forma (retitude). Adaptada da ISO 2692

Com a especificação de uma tolerância geométrica 0 (M), nas peças da figura 8.18, toda a tolerância funcional foi atribuída à tolerância do tamanho, de modo que o tamanho de máximo de matéria (MMS) passou a ser igual ao tamanho virtual (MMVS), que corresponde ao tamanho nominal do respectivo calibre funcional.

Por fim, nas figuras 8.19 a) e 8.19 b), pode observar-se um mesmo veio tolerenciado, respetivamente, com uma tolerância de retitude 0 (M) e com o requisito de envolvente (E). Neste exemplo, a condição virtual de máximo de matéria coincide com a envolvente de forma perfeita de tamanho no máximo de matéria  $\varnothing 15$ . Logo, **os dois requisitos são equivalentes**, quando a especificação geométrica é uma tolerância de forma, e o calibre funcional apropriado para fazer a sua verificação será o mesmo.

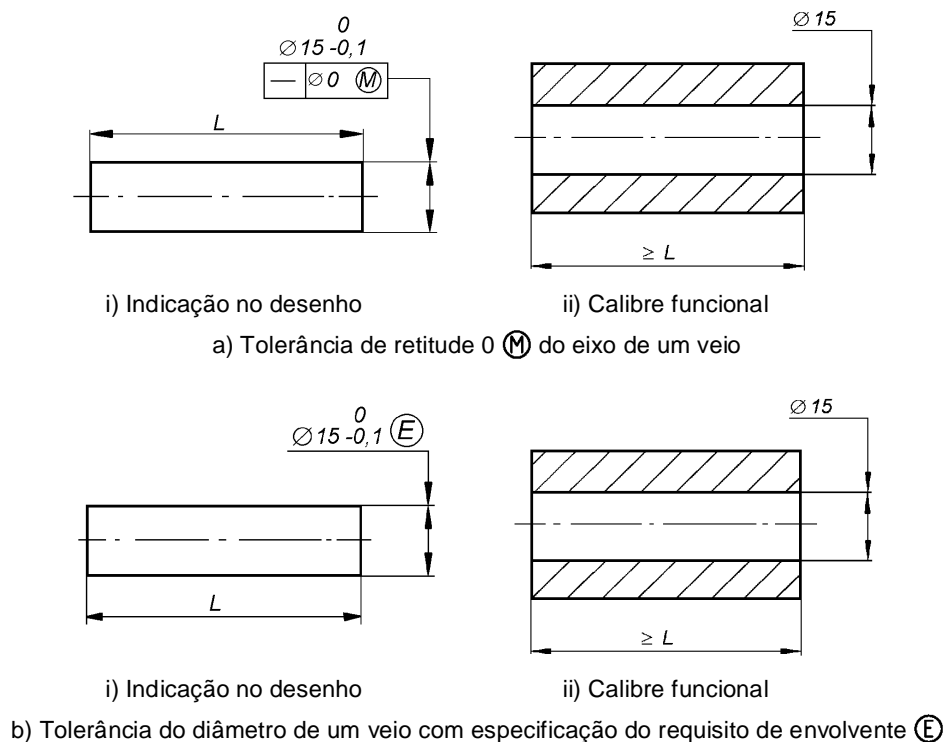


Figura 8.19 – Análise do significado das indicações 0 (M), com tolerâncias de forma, e (E), com requisitos de tamanho. Adaptada da norma Volvo STD 112-0001

O símbolo (E) foi normalizado porque a sua indicação no desenho é mais simples do que a indicação 0 (M), evitando desse modo as dificuldades de escolha e interpretação da tolerância geométrica a adotar [H1].

### 8.3.3 Algumas considerações sobre o aumento da tolerância geométrica

A aplicação do **requisito de máximo de matéria (MMR)** ao **elemento de tamanho tolerenciado**, representado na figura 8.20 a), com base em requisitos de tamanho e de orientação (perpendicularidade), deve preencher as condições assinaladas na figura 8.20 b). A condição virtual de máximo de matéria (MMVC) do elemento de tamanho tolerenciado não deve ser violada pelo elemento (integral) extraído e os tamanhos locais reais devem respeitar os limites de tolerância.

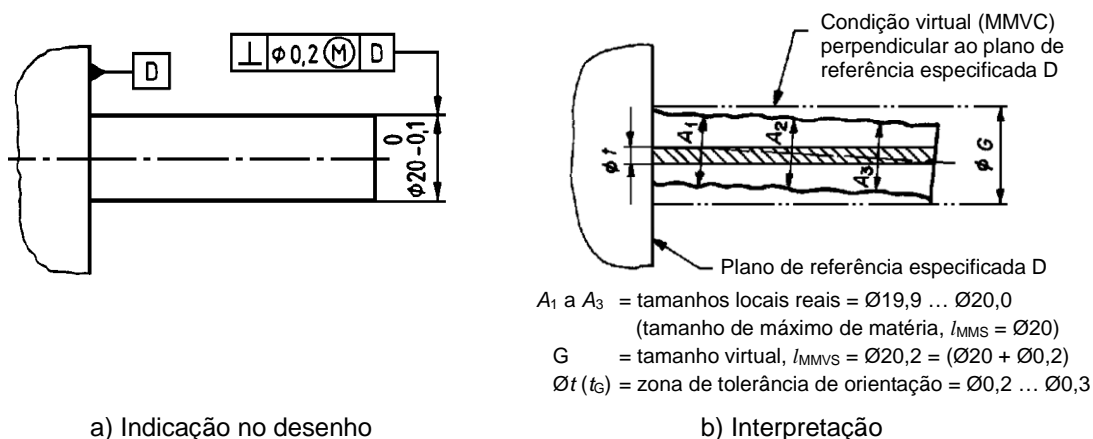


Figura 8.20 – Exemplo de tolerância de perpendicularidade de um veio em relação a um plano de referência, com a aplicação do requisito de máximo de matéria. Adaptada da ISO 2692:1988

Complementarmente, **admitindo que o elemento toleranciado é fabricado sem desvios de forma**, tendo, desse modo, o mesmo tamanho extraído em todas as secções retas (o tamanho de montagem), o requisito de máximo de matéria permite acomodar um aumento da tolerância geométrica ( $t_G$ ), de uma quantidade igual à diferença entre o tamanho de máximo de matéria e o tamanho de montagem (ver figura 8.21). Nesta base, a **tolerância geométrica acrescida** ( $t'_G$ ) pode ser determinada através das expressões seguintes:

– para elementos de tamanho exteriores: 
$$t'_G = t_G + (l_{MMS} - l_{MS,e}) \quad (8.12)$$

– para elementos de tamanho interiores: 
$$t'_G = t_G + (l_{MS,i} - l_{MMS}) \quad (8.13)$$

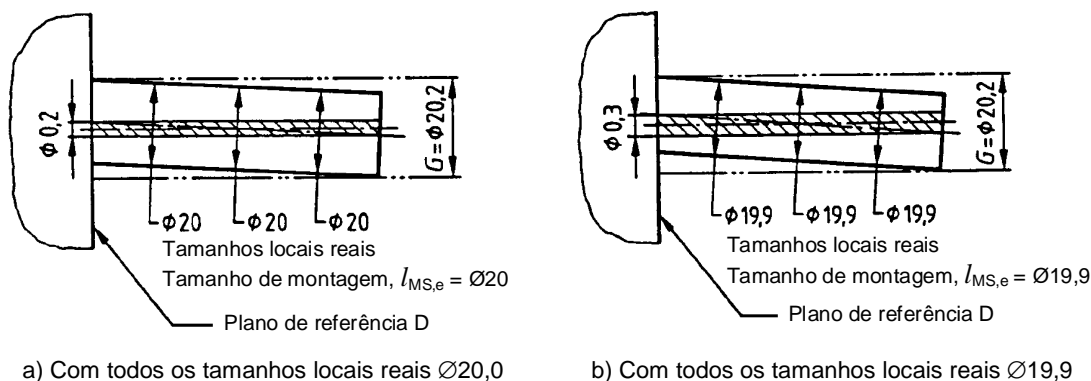


Figura 8.21 – Exemplo de tolerância de perpendicularidade de um veio em relação a um plano de referência, com a aplicação do requisito de máximo de matéria – desvios geométricos admissíveis em função dos tamanhos locais reais. Adaptada da ISO 2692:1988

Constata-se que, se os tamanhos locais reais fossem todos iguais a  $\varnothing 20,0$ , o desvio de perpendicularidade, não poderia exceder  $\varnothing 0,2$ . Por outro lado, se os tamanhos locais reais forem todos iguais a  $\varnothing 19,9$ , o desvio de perpendicularidade não poderá exceder o valor  $\varnothing 0,3$ . Na figura 8.22, esta inter-relação entre tamanho extraído e desvio geométrico admissível do elemento toleranciado, imposta pela função da peça, é expressa através de um **diagrama de tolerância dinâmica**.



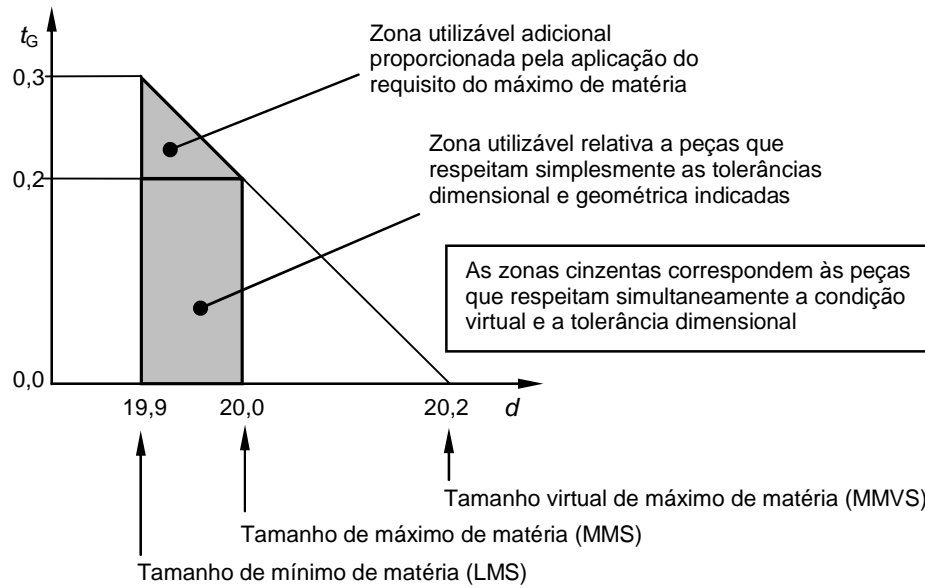
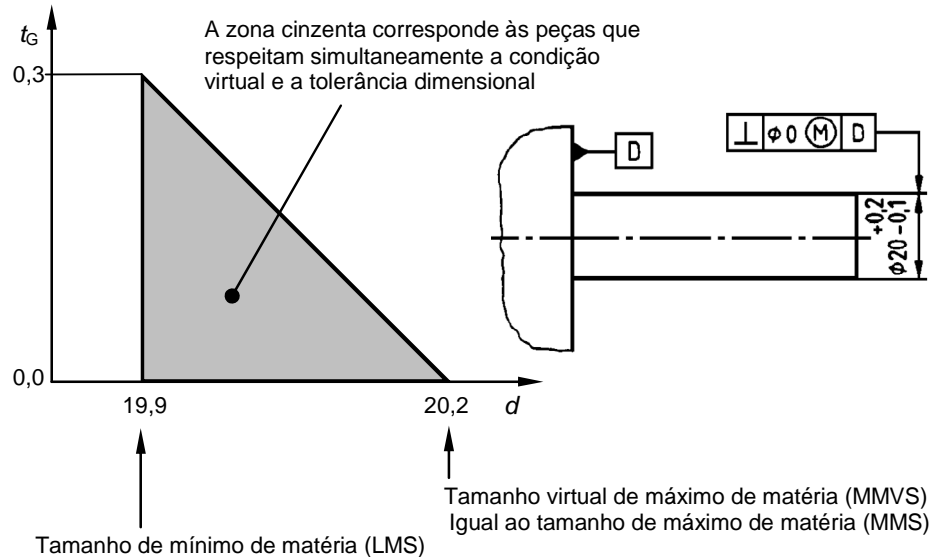


Figura 8.22 – Diagrama de tolerância dinâmica – inter-relação entre tamanho e desvio geométrico admissível do elemento tolerenciado, derivada da especificação de uma tolerância de perpendicularidade  $\phi 0,2 \text{ (M)}$

No caso de se optar pela especificação de uma tolerância de perpendicularidade  $\phi 0 \text{ (M)}$ , a tolerância dimensional deverá ser aumentada, de modo que o tamanho de máximo de matéria (MMS) passe a ser igual ao tamanho virtual de máximo de matéria (MMVS) (ver figura 8.23).



A análise comparativa destes diagramas mostra que esta segunda opção, baseada num ponto de vista estritamente funcional, permitirá um aumento do número potencial de peças produzidas que são consideradas conformes com a especificação.

Os **diagramas de tolerância dinâmica** pretendem mostrar a relação entre o tamanho e o desvio admissível com respeito à tolerância geométrica, admitindo-se, para a sua construção, que essa

relação é linear. No entanto, em cada diagrama, apenas um dos pontos está perfeitamente definido na especificação (na figura 8.22: o ponto  $d = \varnothing 20$ ;  $t_G = \varnothing 0,2$  e na figura 8.23: o ponto  $d = \varnothing 20,2$ ;  $t_G = \varnothing 0$ ). As linhas retas traçadas são apenas extrapolações que requerem a formulação de hipóteses em que, no mínimo, se admite que o elemento toleranciado é isento de desvios de forma. Caso contrário, aquela relação traduzir-se-ia na resolução de um problema complexo, cuja solução, se existisse, não seria certamente linear [S1, B2]. Face às limitações expostas, a partir da sua 2ª edição de 2006, a norma ISO 2692 abandonou a utilização destes diagramas, centrando a sua atenção na **noção de condição virtual**, enquanto envolvente que não deverá ser violada pela matéria da peça.

Por sua vez, quando se aplica o **requisito de máximo de matéria (MMR)** a um **elemento de referência primária**, o eixo de referência ou o plano mediano de referência extraído poderá variar em relação ao(s) elemento(s) toleranciado(s), se existir um desvio em relação ao tamanho de máximo de matéria do elemento de referência, **cuja geometria se admite ser isenta de desvios de forma** (ver figura 8.24). O valor dessa variação é igual à diferença entre o tamanho de montagem,  $I_{MS,i}$ , do elemento de referência e o seu tamanho de máximo de matéria,  $I_{MMS}$ .

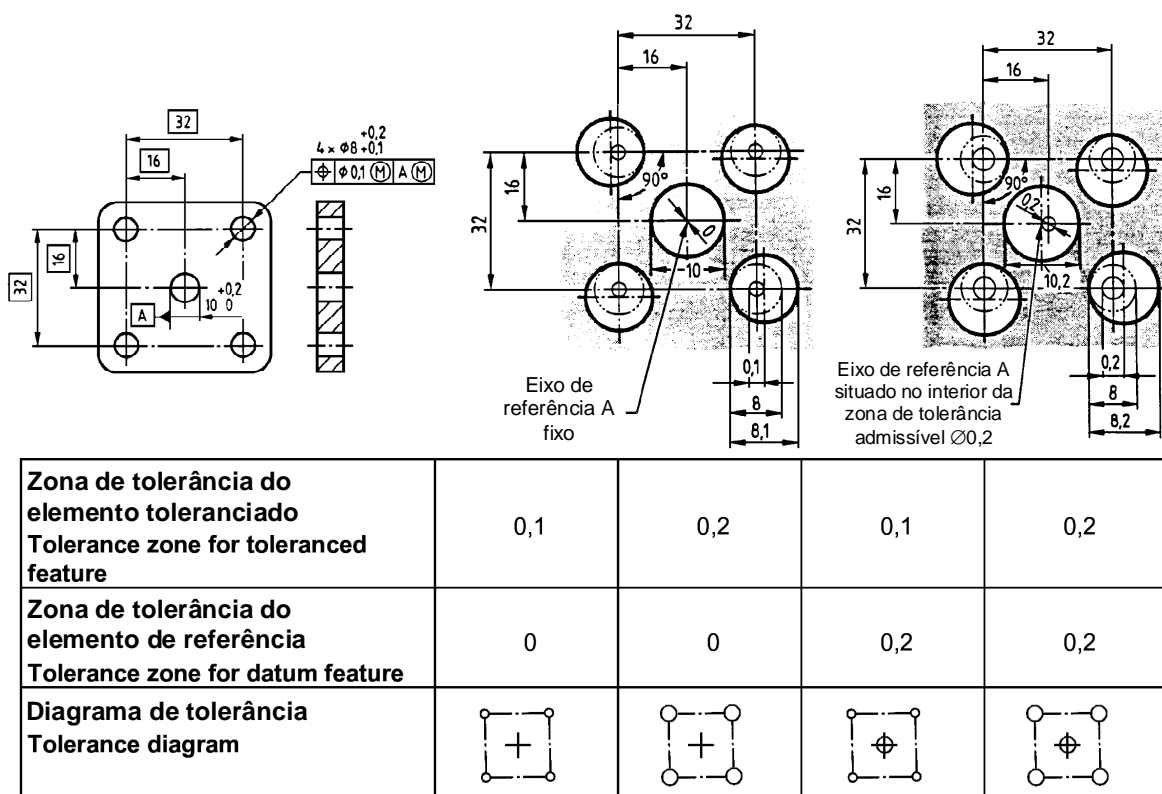


Figura 8.24 – Exemplo de tolerância de localização de quatro furos em relação a um furo de referência, com a aplicação do requisito de máximo de matéria. Adaptada da norma Saab STD 835:1999

O quadro da figura 8.24 apresenta alguns exemplos de possíveis combinações extremas entre as zonas de tolerância dos quatro elementos toleranciados e a zona de tolerância do elemento de referência. A zona de tolerância do elemento de referência funciona como uma tolerância de grupo, em relação à configuração dos quatro elementos toleranciados, permitindo que o elemento de

referência possa flutuar em relação aos quatro elementos. Logo, o valor da zona de tolerância do elemento de referência não pode ser adicionado aos valores das zonas de tolerância de cada um dos elementos toleranciados, pois a sua influência é diferente em cada um deles.

Esta análise refere-se apenas a referências especificadas primárias. Quando o requisito de máximo de matéria se aplica a referências especificadas secundárias ou terciárias, o valor da zona de tolerância do elemento de referência é mais pequeno, devido à necessidade de ter em conta o efeito de desvios de perpendicularidade [H1].

No caso particular de uma relação geométrica entre apenas dois elementos de tamanho (p. ex. de coaxialidade), ver figura 8.5, a possível variação do eixo de referência extraído em relação ao elemento tolerenciado, permitida pela diferença entre o tamanho de montagem e o tamanho virtual de máximo de matéria do elemento de referência tem um efeito no alargamento da tolerância geométrica do elemento tolerenciado [H1]. Assim, admitindo que os elementos geométricos são fabricados sem desvios de forma, a **tolerância geométrica acrescida** ( $t'_G$ ) pode ser determinada através das expressões seguintes:

$$\text{– para elementos de tamanho exteriores: } t'_G = t_G + (l_{MMS,1} - l_{MS,e1}) + (l_{MMS,2} - l_{MS,e2}) \quad (8.14)$$

$$\text{– para elementos de tamanho interiores: } t'_G = t_G + (l_{MS,i1} - l_{MMS,1}) + (l_{MS,i2} - l_{MMS,2}) \quad (8.15)$$

Várias normas nacionais e de empresa utilizavam estas descrições para explicar o requisito de máximo de matéria. No entanto, na realidade, os pressupostos mencionados para os elementos toleranciados não existem e o requisito de máximo de matéria pode também ser aplicado a referências especificadas secundárias e terciárias, ver exemplos nas figuras 8.16, caso (a), e 8.25.

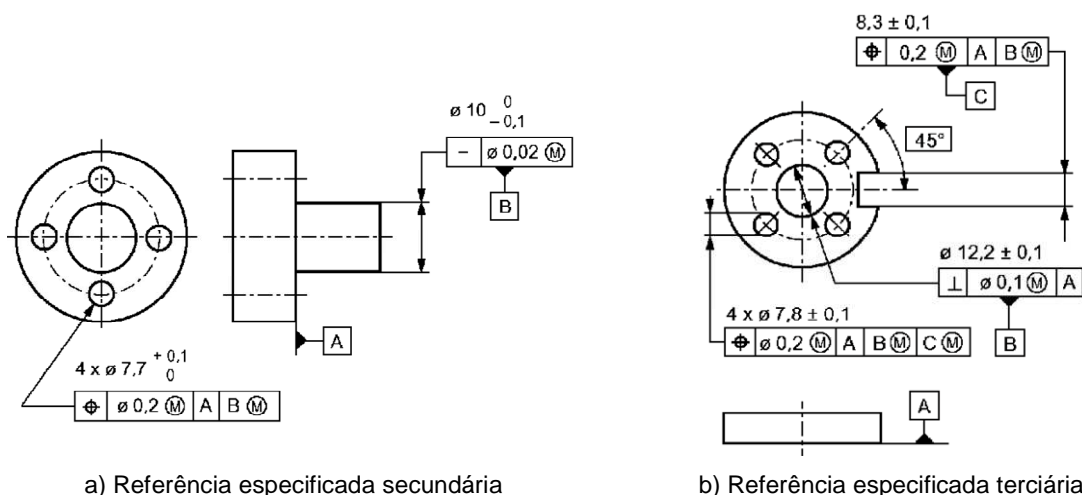


Figura 8.25 – Exemplos de aplicação do requisito de máximo de matéria (M) em referências especificadas secundárias e terciárias [H1]

Por conseguinte, a atual norma ISO 2692 estabelece definições para os diferentes requisitos que são aplicáveis em termos gerais, sem a necessidade de invocar os pressupostos mencionados.

## 8.4 Requisito de mínimo de matéria (LMR)

O requisito de mínimo de matéria (LMR) foi concebido para especificar, por exemplo, uma espessura mínima de parede, permitindo desse modo evitar roturas (causadas, p. ex., pela pressão no interior de um tubo), a distância máxima entre faces numa série de ranhuras, etc. (ver figura 8.26). Pode ser especificado para um ou mais elementos de tamanho, do tipo “cilindro” ou do tipo “duas superfícies planas paralelas opostas”. Permite gerar um requisito combinado entre o tamanho de um elemento de tamanho e os desvios geométricos desse elemento (desvios de forma) e do seu elemento derivado (desvio de posição) (ISO 2692).

O requisito de mínimo de matéria (LMR) num elemento toleranciado permite um aumento da tolerância geométrica quando o elemento se desvia da sua condição de mínimo de matéria (LMC), no sentido da sua condição de máximo de matéria, desde que a condição virtual de mínimo de matéria (LMVC) não seja violada. Deste modo, a tolerância geométrica, especificada no desenho, aplica-se quando o elemento está na sua condição de mínimo de matéria (veio mínimo e furo máximo) e a sua geometria é de forma perfeita. Se o elemento se afastar da sua condição de mínimo de matéria (veio maior e furo mais pequeno), os desvios geométricos poderão ser maiores sem ocorrer a violação da sua condição virtual de mínimo de matéria [H1].

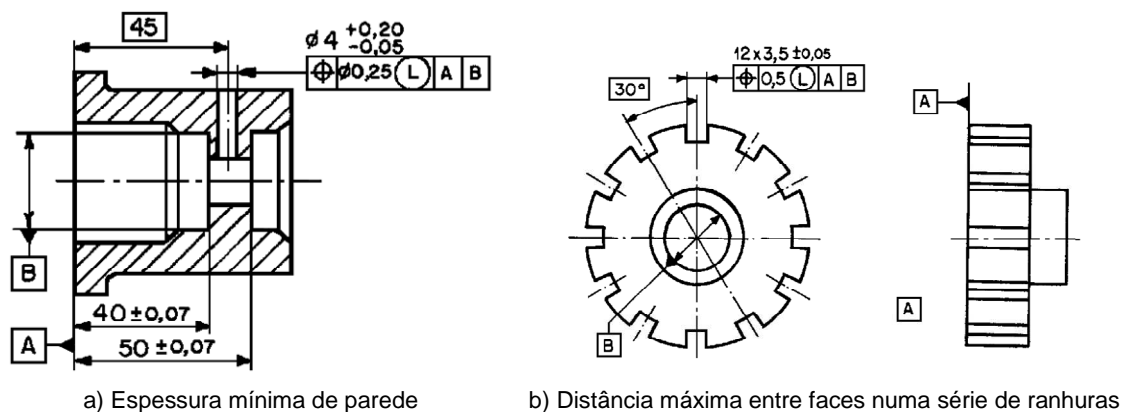


Figura 8.26 – Exemplos de especificações do requisito de mínimo de matéria  $\textcircled{L}$  com vista a assegurar diferentes necessidades funcionais

Quando o requisito de mínimo de matéria se aplica ao elemento toleranciado, tal é indicado nos desenhos pelo símbolo  $\textcircled{L}$ , colocado, no indicador de tolerância, após o valor da tolerância geométrica do elemento derivado do elemento de tamanho (elemento toleranciado).

**Para controlar, completamente, uma “espessura mínima de parede”, o símbolo  $\textcircled{L}$  deve ser aplicado, ao toleranciamento dos elementos, em ambos os lados da parede.** O requisito de mínimo de matéria (LMR) pode ser implementado de dois modos diferentes:

- 1) Os requisitos de posição para os dois lados diferentes da parede podem ser referidos ao mesmo eixo de referência ou sistema de referências especificadas (ver figura 8.29). Neste caso,  $\textcircled{L}$  aplica-se aos dois elementos toleranciados.
- 2) O requisito de posição do elemento derivado para um dos lados da parede pode ser referido ao elemento derivado do outro lado, na sua qualidade de referência especificada. Neste caso, a tolerância para o elemento tolerenciado e a letra que identifica a referência especificada devem ser seguidas do símbolo  $\textcircled{L}$  (ver figura 8.30). Esta possibilidade aplica-se, apenas, se os elementos, em ambos os lados da parede, forem elementos de tamanho.

**Quando o requisito de mínimo de matéria (LMR) se aplica ao elemento tolerenciado**, ele especifica as seguintes **regras** para a(s) superfície(s) do elemento de tamanho:

**Regra H** – Os tamanhos locais extraídos do elemento tolerenciado (ver figura 8.27) devem ser:

- 1) Maiores ou iguais ao tamanho de mínimo de matéria (LMS), para elementos exteriores.
- 2) Menores ou iguais ao tamanho de mínimo de matéria (LMS), para elementos interiores.

Esta regra pode ser alterada pela indicação do requisito de reciprocidade, através do símbolo  $\textcircled{R}$ , após o símbolo  $\textcircled{L}$ .

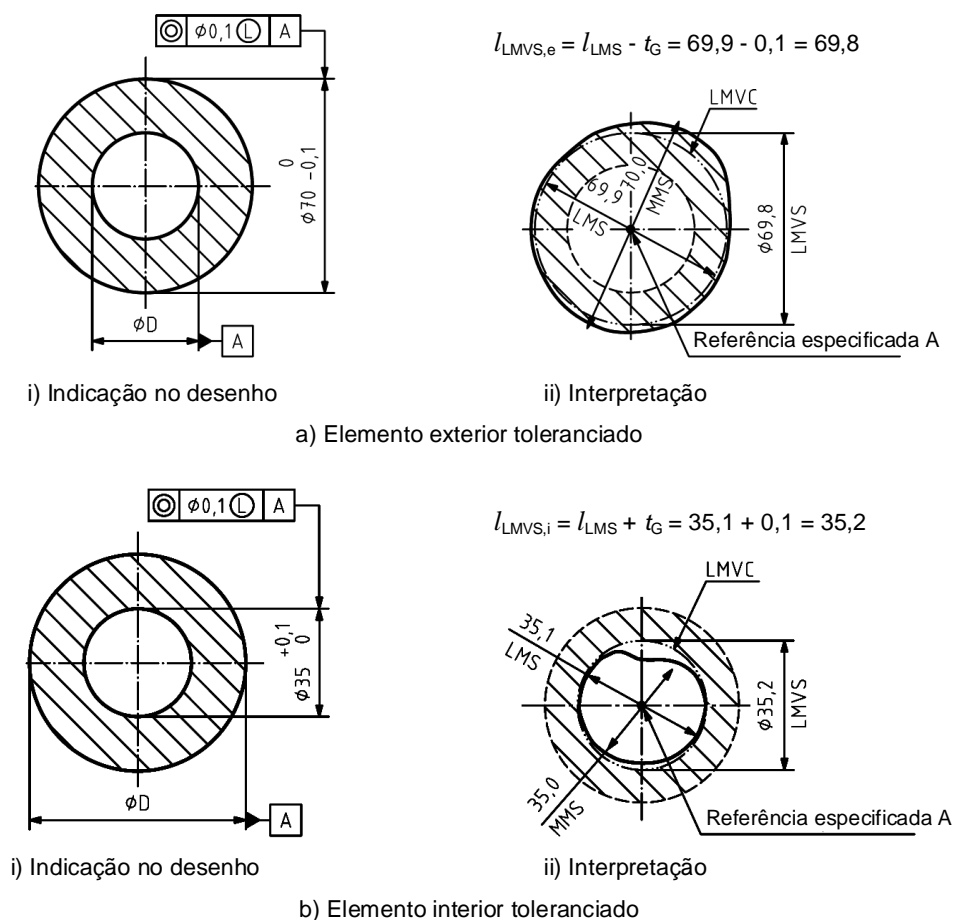
**Regra I** – Os tamanhos locais extraídos do elemento tolerenciado (ver figura 8.27) devem ser:

- 1) Menores ou iguais ao tamanho de máximo de matéria (MMS), para elementos exteriores.
- 2) Maiores ou iguais ao tamanho de máximo de matéria (MMS), para elementos interiores.

**Regra J** – A condição virtual de mínimo de matéria (LMVC) do elemento tolerenciado (ver figura 8.27) não deve ser violada pelo elemento (integral) extraído.

A utilização do requisito de envolvente  $\textcircled{E}$  pode dar origem a requisitos supérfluos, tendo em conta a a função prevista para o(s) elemento(s) (“espessura mínima de parede”). A utilização de tais restrições e definições de tamanho reduz as vantagens técnicas e económicas do requisito de mínimo de matéria (LMR).

**Regra K** – Quando a especificação geométrica é uma tolerância de orientação ou de posição relativamente a uma referência especificada (primária) ou a um sistema de referências especificadas, a condição virtual de mínimo de matéria (LMVC) do elemento tolerenciado deve ter uma orientação ou uma posição teoricamente exata relativamente a essa referência especificada ou sistema de referências especificadas (ver figuras 8.29 e 8.30). Além disso, no caso de vários elementos toleranciados serem controlados pela mesma indicação de tolerância, as condições virtuais de mínimo de matéria (LMVCs) devem também ter orientações e posições teoricamente exatas, umas em relação às outras, para além das possíveis restrições em relação à(s) referência(s) especificada(s).



**Nota 1:** Neste caso, as tolerâncias de coaxialidade/concentricidade e de localização podem ser utilizadas com o mesmo significado.

**Nota 2:** Estas figuras ilustram apenas algumas regras para o requisito de mínimo de matéria. As indicações nos desenhos não são suficientes para controlar a espessura mínima de parede. O requisito de mínimo de matéria no outro elemento está em falta. Logo, não é possível indicar uma função.

Figura 8.27 – Exemplos de indicação do requisito de máximo de matéria (LMR) em elementos de tamanho toleranciados. Adaptada da ISO 2692

No caso de vários elementos toleranciados controlados pela mesma indicação de tolerância, o requisito de mínimo de matéria (LMR), sem qualquer outro modificador para além do  $\textcircled{L}$ , tem o mesmo significado do requisito resultante da indicação simultânea dos modificadores **CZ**  $\textcircled{L}$  (ver o ISO/DIS 5458 e o ponto 2 da secção 7.4.1.2.1 deste texto). Para especificar requisitos que devem ser aplicados em separado, deve utilizar-se o modificador **SZ** antes de  $\textcircled{L}$ .

**Quando o requisito de mínimo de matéria (LMR) se aplica ao elemento de referência,** tal deve ser indicado, nos desenhos, através do símbolo  $\textcircled{L}$  colocado, no indicador de tolerância, após a(s) letra(s) que designam a referência especificada. A utilização do símbolo  $\textcircled{L}$  após a letra que designa a referência especificada só é possível se esta última for obtida a partir de um elemento de tamanho (ver figura 8.30).

Se o requisito de mínimo de matéria (LMR) se aplicar a todos os elementos da coleção de superfícies de uma **referência especificada comum**, a correspondente sequência de letras, que identificam

essa referência especificada comum, é indicada entre parêntesis [ver figura 8.28 a)] e as condições virtuais de mínimo de matéria (LMVCs) são, por omissão, restringidas em orientação e posição, umas relativamente às outras. Quando o requisito de mínimo de matéria (LMR) se aplica apenas a um elemento da coleção de superfícies de uma referência especificada comum, a sequência de letras que identifica essa referência especificada comum não é indicada entre parêntesis e o requisito aplica-se apenas ao elemento identificado pela letra colocada imediatamente antes do símbolo  $\textcircled{L}$ , ver figura 8.28 b).



Figura 8.28 – Exemplos de aplicação do requisito de mínimo de matéria a elementos da coleção de superfícies de diferentes referências especificadas comuns

No caso de **elementos de referência**, este requisito especifica as seguintes **regras** para a(s) superfície(s) do elemento de tamanho:

**Regra L** – A condição virtual de mínimo de matéria (LMVC) do elemento de referência considerado não deve ser violada pelo elemento de referência (integral) extraído, a partir do qual foi derivada a referência especificada (ver figura 8.30).

**Regra M** – O tamanho da condição virtual de mínimo de matéria (LMVC), do elemento de referência considerado, deve ser o tamanho de mínimo de matéria (LMS), quando o elemento de referência considerado não está sujeito a qualquer especificação geométrica (ver figura 8.30), tem apenas especificações geométricas cujo valor de tolerância não é seguido do símbolo  $\textcircled{L}$  ou não tem qualquer especificação geométrica que respeite a **regra N**.

Nestes casos, o LMVS para elementos de tamanho exteriores e interiores,  $I_{LMVS}$ , é dado por:

$$I_{LMVS} = I_{LMS} \pm 0 = I_{LMS} \quad (8.16)$$

**Regra N** – O tamanho da condição virtual de mínimo de matéria (LMVC),  $I_{LMVS}$ , do elemento de referência considerado deve ser igual ao tamanho de mínimo de matéria (LMS)  $I_{LMS}$ , menos (para elementos de tamanho exteriores) ou mais (para elementos de tamanho interiores) a tolerância geométrica,  $t_G$ , quando o elemento de referência é controlado por uma especificação geométrica com as seguintes propriedades:

- 1) o valor da sua tolerância é seguido do símbolo  $\textcircled{L}$ , e
- 2) é uma especificação de forma, sendo a referência especificada considerada correspondente à referência especificada primária do indicador de tolerância, em que o símbolo  $\textcircled{L}$  está indicado após a letra que identifica a referência especificada, ou
- 3) é uma especificação de orientação/posição cuja referência especificada ou sistema de referências especificadas contém exatamente a(s) mesma(s) referência(s) especificada(s), pela

mesma ordem que foram indicadas antes da referência considerada no indicador de tolerância, em que o símbolo  $\odot$  é indicado após a letra que identifica a referência especificada.

Neste caso, o tamanho virtual de mínimo de matéria (LMVS), para elementos de tamanho exteriores, é calculado pela expressão 8.3 e, para elementos de tamanho interiores, é determinado pela expressão 8.4. Quando as propriedades atrás indicadas não se verificam, aplica-se a **regra M**.

Com a **regra N**, o indicador do elemento de referência deve ser ligado diretamente ao indicador de tolerância geométrica, a partir do qual é controlada a condição virtual de mínimo de matéria (LMVC) do elemento de referência (ver as normas ISO 5459:2011 e ISO 2692).

Nos dois exemplos seguintes, apresentados nas figuras 8.29 e 8.30, a função pretendida para as peças é a sua capacidade de resistir a uma pressão interna, evitando a rotura.

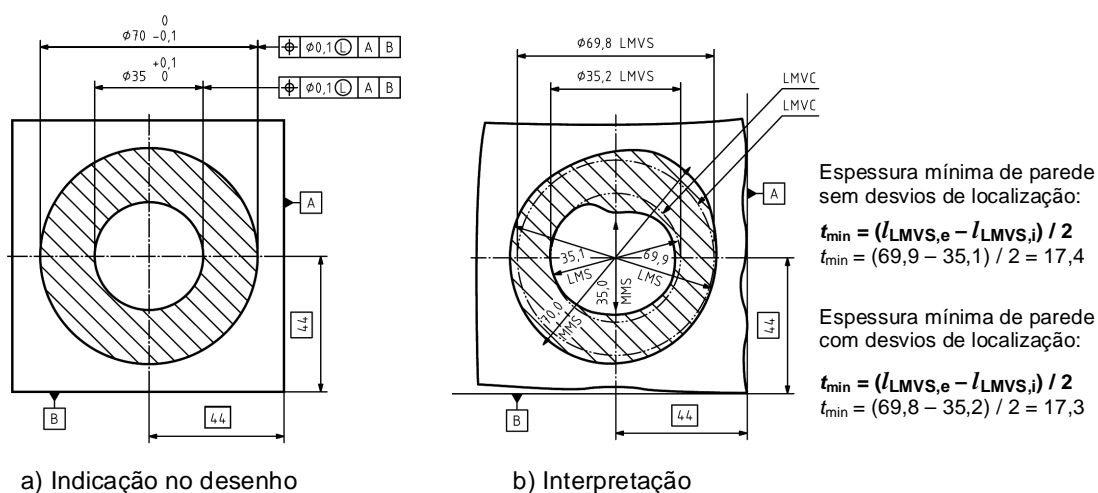


Figura 8.29 – Exemplo de requisito de mínimo de matéria (LMR) para dois elementos cilíndricos concêntricos (exterior e interior), ambos controlados por tamanho e posição (localização) em relação ao mesmo sistema de referências especificadas A e B. Adaptada da ISO 2692

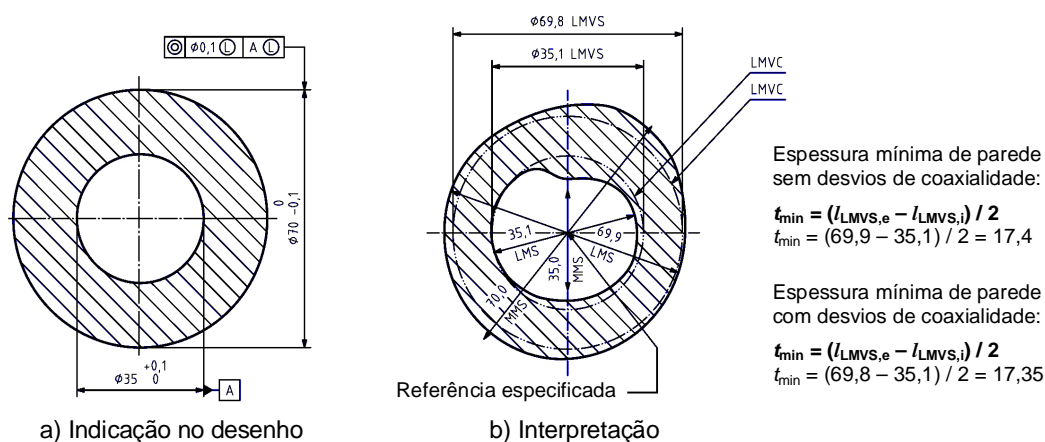
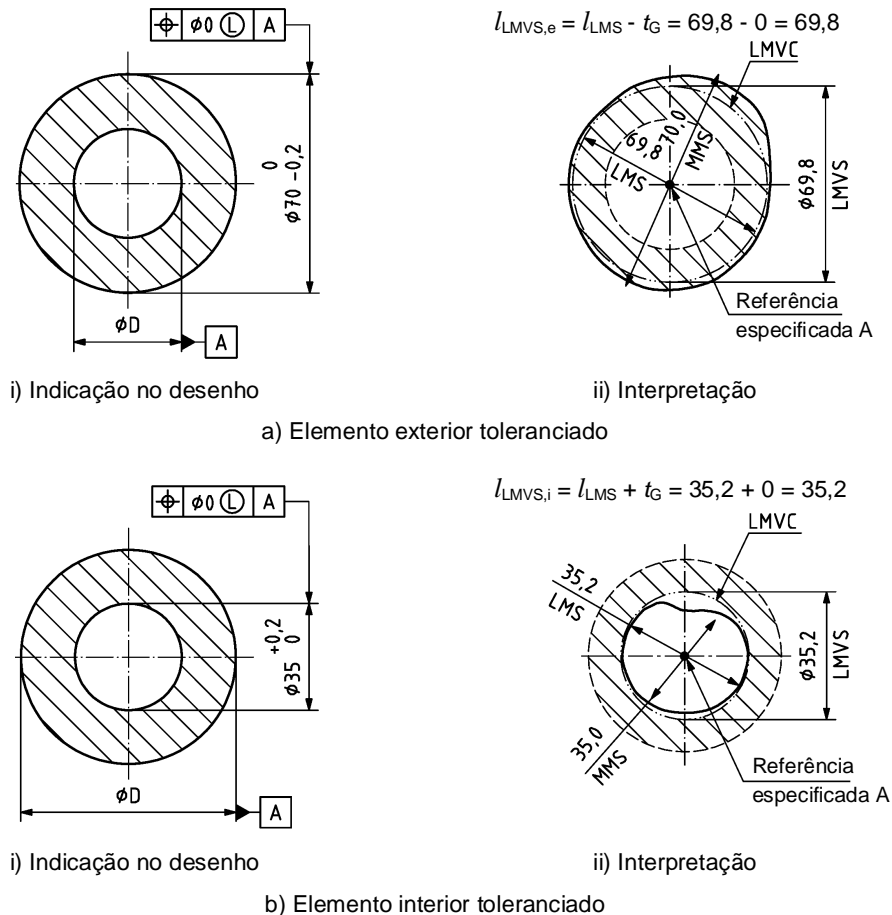


Figura 8.30 – Exemplo de requisito de mínimo de matéria (LMR) para um elemento cilíndrico exterior controlado por tamanho e posição (coaxialidade), em relação ao elemento cilíndrico interior utilizado como uma referência especificada, controlado por tamanho e requisito de mínimo de matéria (LMR). Adaptada da ISO 2692



### 8.4.1 O significado da especificação de uma tolerância geométrica zero

Nos exemplos apresentados nas figuras 8.27 a) e 8.27 b), a tolerância funcional foi repartida entre o tamanho e a localização. O caso extremo será atribuir toda a tolerância ao tamanho e indicar uma tolerância de localização zero. Nesse caso, a tolerância dimensional deverá ser aumentada, passando a ser igual à soma da tolerância dimensional e da tolerância de localização, anteriormente indicadas, de modo que o tamanho de mínimo de matéria (LMS) passe a ser igual tamanho virtual de mínimo de matéria (LMVS) (ver figuras 8.31).



**Nota 1:** Neste caso, as tolerâncias de coaxialidade/concentricidade e de localização podem ser utilizadas com o mesmo significado.

**Nota 2:** Estas figuras ilustram apenas algumas regras para o requisito de mínimo de matéria. As indicações nos desenhos não são suficientes para controlar a espessura mínima de parede. O requisito de mínimo de matéria no outro elemento está em falta. Logo, não é possível indicar uma função.

Figura 8.31 – Exemplos de indicação do requisito de máximo de matéria (LMR) (com 0 L) em elementos de tamanho toleranciados. Adaptada da ISO 2692

A especificação de uma tolerância geométrica zero, na condição de mínimo de matéria, é normalmente preferível, pois este modo de cotagem e toleranciamento, ao induzir um aumento da tolerância dimensional, fornece, diretamente, o valor do tamanho virtual de mínimo de matéria (LMVS). A escrita de uma tolerância geométrica 0 L indica uma possibilidade de repartição arbitrária entre uma tolerância de tamanho e uma tolerância geométrica, sem ter de formalizar essa relação,

contribuindo desse modo para uma diminuição das restrições impostas ao processo de fabricação [B2].

### 8.4.2 Considerações sobre o aumento da tolerância geométrica

Uma explicação sobre este assunto semelhante à dada, na secção 8.3.3, para o requisito de máximo de matéria (MMR) deve também ser tida em conta no caso do requisito de mínimo de matéria (LMR).

## 8.5 Requisito de reciprocidade (RPR)

O **requisito de reciprocidade (RPR)** deve ser indicado nos desenhos como um requisito adicional ao requisito de máximo de matéria (MMR) ou ao requisito de mínimo de matéria (LMR), através da inscrição do símbolo  $\textcircled{R}$ , no indicador de tolerância, após o símbolo  $\textcircled{M}$  [ver figura 8.32 b)] ou após o símbolo  $\textcircled{L}$  [ver figura 8.35 c)]. O requisito de reciprocidade é apenas aplicável ao(s) elemento(s) toleranciado(s), sempre que tal se justifique, tendo em conta a função destes.

O requisito adicional RPR permite um aumento da tolerância dimensional do elemento de tamanho, nos requisitos coletivos MMR e LMR. O requisito de reciprocidade possibilita que o tamanho possa tirar todo o partido das condições virtuais de máximo de matéria (MMVC) ou de mínimo de matéria (LMVC), permitindo que seja feita uma escolha da distribuição da variação admissível entre as tolerâncias dimensionais e geométricas, em função das capacidades de fabricação disponíveis.

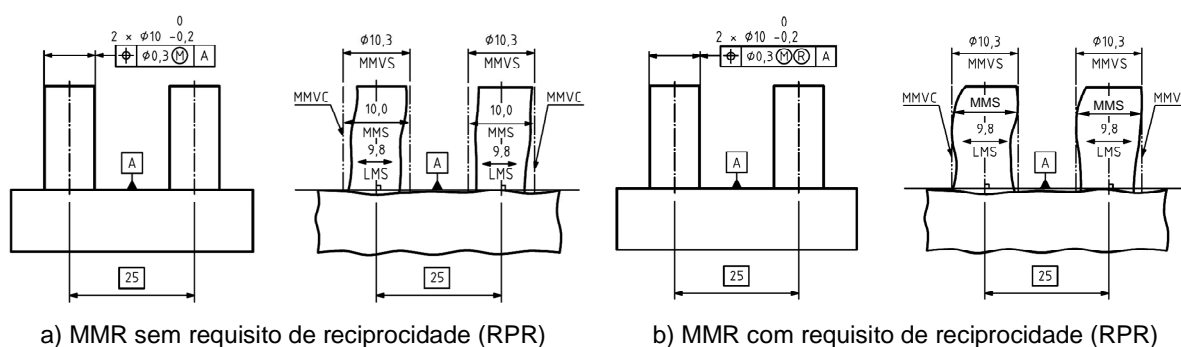


Figura 8.32 – Exemplos do requisito de máximo de matéria (MMR) para dois elementos cilíndricos exteriores baseados em requisitos de tamanho e de posição (localização). Adaptada da ISO 2692

Em contraste com todos os outros requisitos de toleranciamento, em que os desvios de forma, de orientação e de posição podem exceder a tolerância geométrica, se a tolerância dimensional não for completamente aproveitada, o **requisito de reciprocidade (RPR)** permite um aumento da tolerância dimensional, de modo que o tamanho local possa tomar valores até ao limite do tamanho virtual MMVS [ver figura 8.32 b)] ou LMVS [ver figura 8.35 c)], se os desvios geométricos de forma, de orientação e de posição não tirarem todo o partido da condição virtual de máximo de matéria (MMVC) ou da condição virtual de mínimo de matéria (LMVC) [H2].

Nos exemplos de grupos de elementos de tamanho “furo” e “veio” toleranciados em localização, apresentados, respectivamente, nas figuras 8.33 e 8.34, o requisito de reciprocidade  $\textcircled{R}$  aparece especificado, no desenho, em conjunto com o requisito de máximo de matéria  $\textcircled{M}$ .

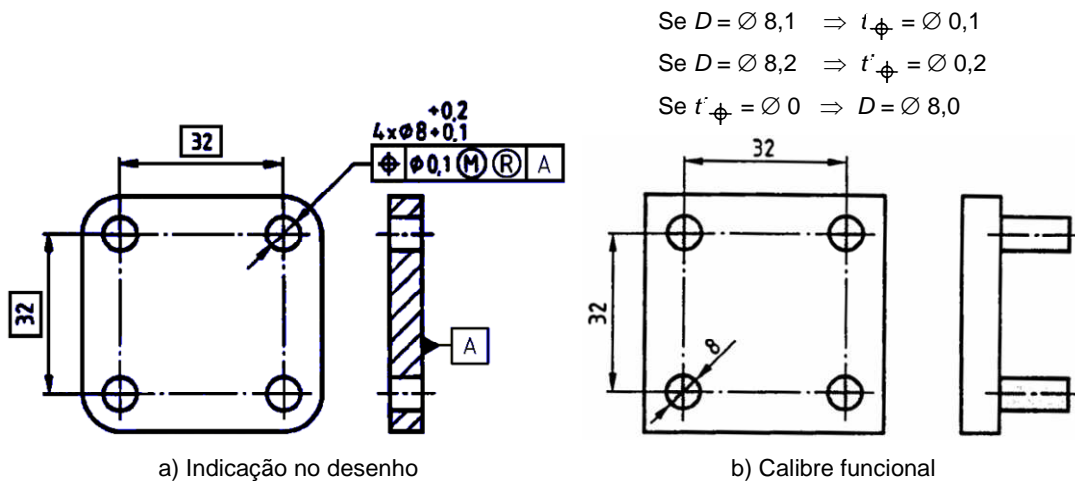


Figura 8.33 – Especificação de uma tolerância de localização de quatro furos, uns em relação aos outros e em relação ao plano de referência A, com a aplicação dos requisitos de máximo de matéria e de reciprocidade

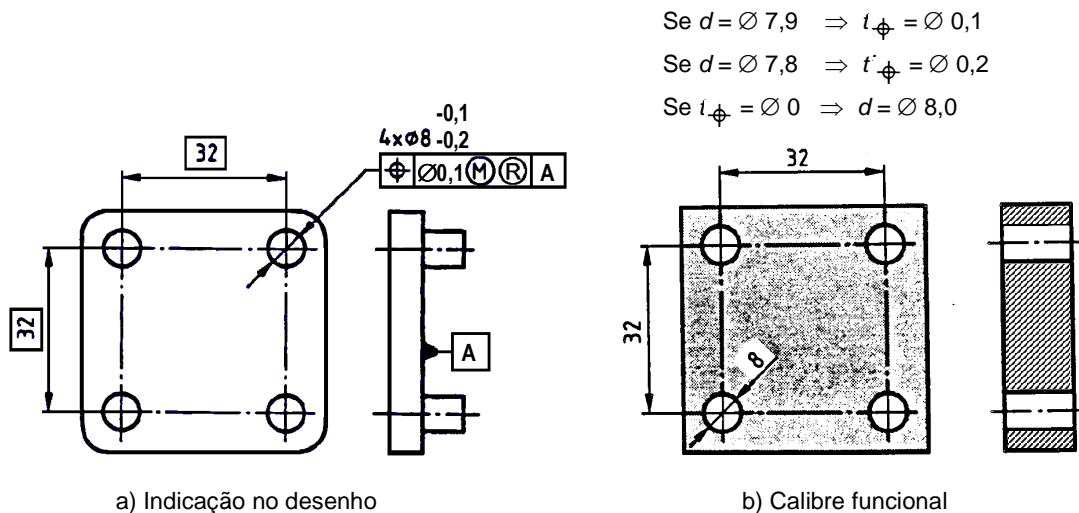
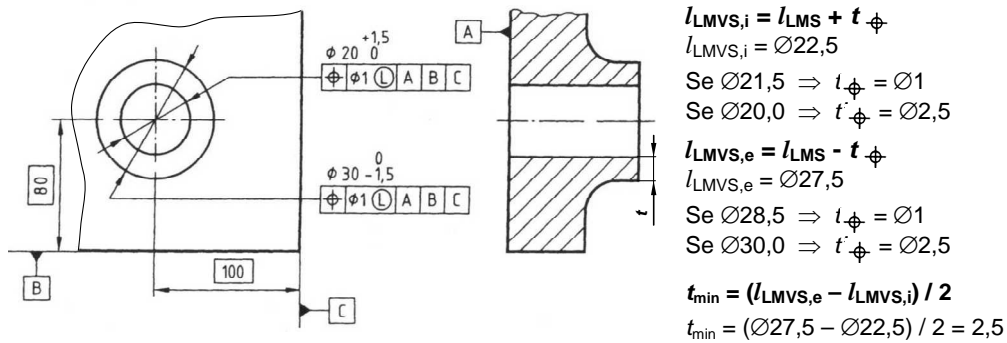


Figura 8.34 – Especificação de uma tolerância de localização de quatro pinos, uns em relação aos outros e em relação ao plano de referência A, com a aplicação dos requisitos de máximo de matéria e de reciprocidade

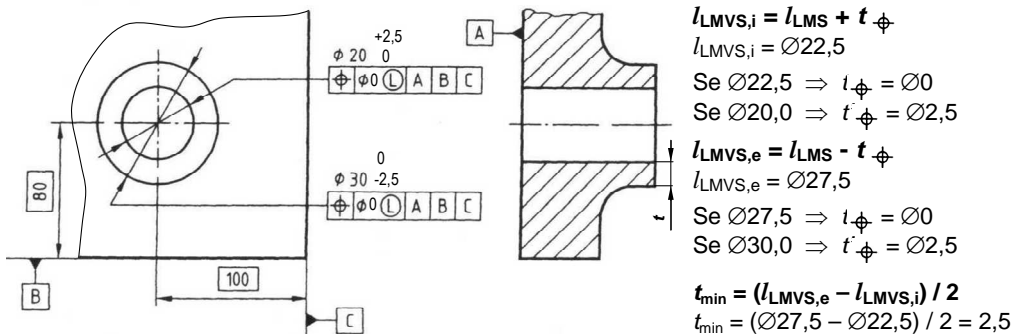
A análise dos exemplos dados permite concluir que o requisito de reciprocidade e a indicação  $\textcircled{M}$  podem expressar as mesmas necessidades funcionais da peça, isto é,  $\varnothing t_{\oplus} \textcircled{M} \textcircled{R} \equiv \varnothing 0 \textcircled{M}$ . No entanto, ao contrário da inscrição  $\textcircled{M}$ , uma indicação do requisito de reciprocidade  $\textcircled{R}$ , num desenho, funciona como uma recomendação para o fabricante sobre a distribuição da tolerância total em termos de tamanho e de características geométricas, facilitando a comunicação entre o planeamento da produção e a oficina [H1].

No exemplo apresentado na figura 8.35, pode observar-se a utilização do requisito de mínimo de matéria  $\textcircled{L}$ , no controlo da espessura mínima de parede entre dois elementos de tamanho de uma peça, posicionados coaxialmente e admitidos sem desvios de forma. A análise comparada das diferentes especificações permite constatar as vantagens das indicações  $\varnothing 0 \textcircled{L}$  e  $\varnothing t \textcircled{L} \textcircled{R}$ .

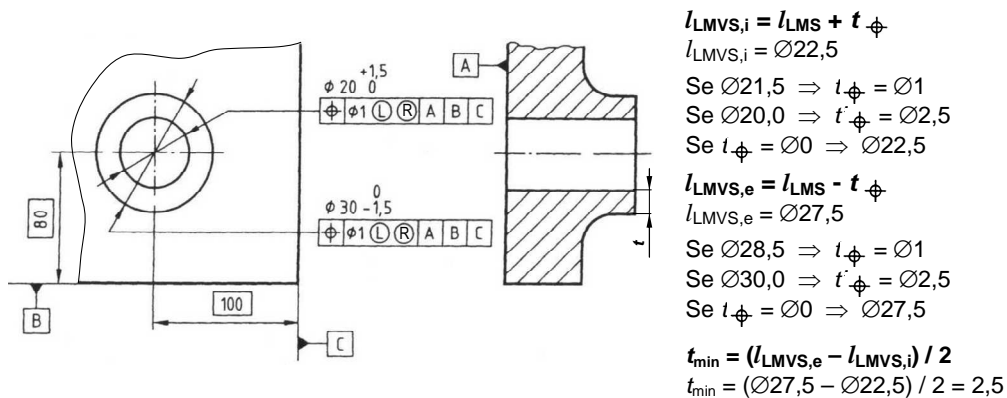
Espessura mínima de parede sem desvios de localização:  $t_{\min} = (\varnothing 28,5 - \varnothing 21,5) / 2 = 3,5$



a) Tolerância de localização, na condição de mínimo de matéria, para controle da coaxialidade



b) Tolerância de localização zero, na condição de mínimo de matéria, para controle da coaxialidade



c) Tolerância de localização, na condição de mínimo de matéria, para controle da coaxialidade, com a especificação do requisito de reciprocidade

Figura 8.35 – Comparação entre requisitos especificados, na condição de mínimo de matéria, para o controle da espessura mínima de parede entre dois elementos de tamanho coaxiais de uma peça ISO. Adaptada da norma ISO 2692:1988/Amd.1:1992

O requisito de concepção é  $\varnothing 0 \text{ (L)}$  (tolerância correlacionada com a função). O requisito de reciprocidade produz o mesmo efeito da indicação  $\varnothing 0 \text{ (L)}$ , num desenho. No entanto, ao invés desta, uma indicação do requisito de reciprocidade  $\text{(R)}$  funciona, para o fabricante, como uma recomendação sobre a distribuição da tolerância total, em termos de tamanho e de características geométricas, facilitando a comunicação entre o planejamento da produção e a oficina (tolerância relacionada com a fabricação). Com a especificação do requisito  $\text{(R)}$ , poderão coexistir várias tolerâncias correlacionadas com a fabricação, derivadas da mesma tolerância relacionada com a função, em conformidade com as necessidades de oficinas diferentes [H1].

## 8.6 Relação entre a função das peças e as tolerâncias geométricas

Com a aplicação, por omissão, do princípio de independência na definição do relacionamento entre as especificações dimensionais e geométricas inscritas nos desenhos técnicos, os gabinetes de estudos devem especificar as tolerâncias geométricas e os requisitos funcionais (envolvente, máximo de matéria, ...) considerados adequados, de acordo com a função da peça. O quadro 8.1, apresentado no guia CNOMO GE40-040N e na referência [B1], é um exemplo de uma síntese informativa que pode ser utilizada como apoio a essa especificação, bem como para a escolha do método de verificação. O guia CNOMO GE40-040N assinalava que este quadro, fornecido apenas a título indicativo, deveria ser posteriormente completado, em função de estudos então em curso e de propostas formuladas pelos utilizadores.

Quadro 8.1 – Relação entre a função das peças e os desvios geométricos [B1]

Funções		Forma	Orientação	Posição	Batimento	E, I, M
Escorregamento Atrito Almofada de ar	macho – fêmea	X	(X)	X	(X)	E
	plano sobre plano	X				I
Rolamento	de esferas	X		X		E
	caminho de esferas	X				I
Vedação com junta que admite as varia- ções de diâmetro	montagem deslizante	X		X		I
	montagem rotativa	X			X	I
Vedação sem junta ou (1)	montagem deslizante	X		X		E
	montagem rotativa	X			X	E
Montagem ou ajustamento fixo	com tensão (aperto)	X	X	(X)		E
	ajustado	X	X			E
	com folga			X		M
Guiamento	em translação	X	X			E
	em rotação	X			X	E
Posicionamento estático				X		E
Aderência ou/e vedação com colagem		X				I
Resistência ao encaixe		X				I
Escoamento de fluídos		X				I
Ferramentas de corte		X			X	I
Aspecto		X				I
Estigmatismo (óptica)		X				I
Equilíbrio (equilíbrio)					X	I

(1) = com junta que não admite as variações de diâmetro.

X = Tolerâncias importantes para a função.

(X) = A especificar, se necessário.

E = Envolvente; I = Independência; M = Máximo de matéria.

O **requisito de envolvente** (E) traduz uma condição de montagem local entre dois elementos conjugados com um ajustamento de contacto fixo ou móvel, permitindo estabelecer uma relação entre o tamanho e a forma, enquanto o **requisito de máximo de matéria** (M) possibilita a especificação, em termos geométricos, da montagem, nominalmente hiperestática e sem deformação, de uma peça “veio” com uma peça “furo”, estabelecendo uma relação entre tamanho e forma, tamanho e orientação ou tamanho e posição, conforme se mostra, de modo esquemático, na figura 8.36.

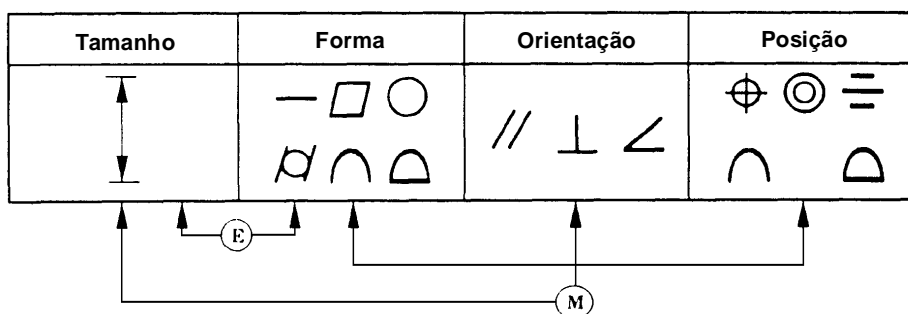


Figura 8.36 – Interdependência entre tamanho e geometria (guia CNOMO GE40-040N)

O que diferencia o requisito de envolvente do requisito de máximo de matéria é o facto do primeiro impor um limite virtual a um elemento único, do tipo “cilindro” ou do tipo “dois planos paralelos opostos”, em cada uma das peças conjugadas, enquanto o segundo pode especificar, em simultâneo, os limites virtuais de vários elementos nas duas peças.

Por sua vez, o **requisito de mínimo de matéria** (L) deve ser utilizado sempre que se pretende especificar uma forma perfeita, que fique totalmente englobada no interior da matéria de um elemento real. Permite, por exemplo, assegurar a obtenção de espessuras mínimas de parede, de modo a evitar a ocorrência de roturas, ou limitar a amplitude dos deslocamentos relativos entre duas peças montadas [B2].

## 8.7 Considerações finais

O requisito de máximo de matéria, indicado nos desenhos por meio do símbolo (M), e o requisito de mínimo de matéria, indicado nos desenhos através do símbolo (L), são requisitos de interdependência entre tamanho e geometria que permitem combinar duas especificações de tolerância independentes, aplicadas a um ou mais elementos de tamanho, num **requisito coletivo** que simula, de um modo mais exato, a função pretendida para a peça e diz respeito apenas ao elemento integral, relacionado com a(s) superfície(s) desse(s) elemento(s).

A inscrição dos símbolos (M) ou (L) num dos compartimentos do indicador de tolerância geométrica muda completamente o significado da especificação, com a introdução da **noção de condição virtual** para o(s) elemento(s) tolerenciado(s) e, se aplicável, para o(s) elemento(s) de referência. A atual norma ISO 2692 atribui uma grande importância a esta noção, enquanto “estado de um

elemento associado” que não deve ser violado pela matéria da peça. Esta envolvente de forma perfeita permite descrever, de modo muito simples, a fronteira imposta pela condição funcional estabelecida.

O **requisito de máximo de matéria (MMR)** foi o primeiro destes conceitos a ser introduzido, nos USA, na década de quarenta do século XX, com o objetivo de assegurar uma melhoria da “**aptidão para a montagem**” de peças componentes de **ligações com folga**, no âmbito de sistemas mecânicos mais ou menos complexos. No entanto, a primeira norma internacional neste domínio só veio a ser publicada em 1974. Com este requisito, se o tamanho de um elemento de uma das peças da montagem não atingir o seu valor de máximo de matéria, a tolerância geométrica indicada para o seu elemento derivado poderá ser excedida sem pôr em perigo a montagem com a outra peça, desde que a **condição virtual de máximo de matéria (MMVC)**, gerada por este efeito coletivo, não seja violada. Este conceito de condição virtual está na base da construção dos **calibres funcionais** que podem ser utilizados na verificação deste requisito.

O **requisito de mínimo de matéria (LMR)** começou por ser introduzido na normalização americana, em 1973, tendo sido posteriormente normalizado no seio da ISO, em 1992, com vista a permitir, por exemplo, controlar a existência de uma “**espessura mínima de parede**”, de modo a evitar a ocorrência de roturas em peças submetidas a uma pressão interna. Com este requisito, se o tamanho do elemento toleranciado se afastar do seu valor de mínimo de matéria, a tolerância geométrica indicada para o seu elemento derivado poderá ser excedida sem comprometer o desempenho da peça, desde que a **condição virtual de mínimo de matéria (LMVC)**, gerada por este efeito coletivo, não seja violada.

A especificação de uma **tolerância geométrica zero, na condição de máximo de matéria ou de mínimo de matéria** (tolerância correlacionada com a função), é normalmente preferível, pois este modo de cotação e toleranciamento, ao induzir um aumento da tolerância dimensional, fornece, diretamente, o valor do tamanho virtual de máximo de matéria (MMVS), que corresponde ao tamanho nominal do calibre funcional, ou o valor do tamanho virtual de mínimo de matéria (LMVS). A escrita de uma tolerância geométrica 0 **(M)** ou 0 **(L)** indica uma possibilidade de repartição arbitrária entre uma tolerância de tamanho e uma tolerância geométrica, sem ter de formalizar essa relação, contribuindo desse modo para uma diminuição das restrições impostas ao processo de fabricação.

O **requisito de reciprocidade (RPR)**, introduzido na normalização internacional, em 2006, pode ser utilizado como um requisito adicional ao requisito de máximo de matéria **(M) (R)** ou ao requisito de mínimo de matéria **(L) (R)**. Este requisito permite um aumento da tolerância dimensional do elemento tamanho, de modo que o tamanho local possa tomar valores até ao limite do tamanho virtual, se os desvios geométricos não tirarem todo o partido da respetiva condição virtual.

A especificação do requisito de reciprocidade **(R)** é funcionalmente equivalente à especificação de uma tolerância geométrica 0 **(M)** ou 0 **(L)**. No entanto, ao invés desta, uma indicação do requisito de

reciprocidade funciona como uma recomendação, para o fabricante, sobre a distribuição da tolerância total, em termos de tamanho e de características geométricas, facilitando a comunicação entre o planeamento da produção e a oficina (tolerância relacionada com a fabricação). Com a especificação do requisito  $\textcircled{R}$ , poderão coexistir várias tolerâncias correlacionadas com a fabricação, derivadas da mesma tolerância relacionada com a função, em conformidade com as necessidades de diferentes oficinas.

A partir da sua 2ª edição de 2006, a norma ISO 2692 abandonou a utilização dos **diagramas de tolerância dinâmicos** para efetuar uma representação gráfica da relação, imposta pela função, entre o tamanho de montagem e o desvio geométrico, uma vez que estes diagramas não têm em conta o efeito dos desvios de forma que pode ser favorável para a montagem [S1, B2]. Em contrapartida, a atual norma ISO 2692 passou a centrar a sua atenção na **noção de condição virtual**, enquanto fronteira que não deve ser ultrapassada pela matéria da peça.

A presente edição da norma ISO 2692 é um documento baseado na prática industrial e nas tradições existentes que foi enriquecido com novos conceitos destinados a assegurar que as especificações e as indicações a inscrever nos desenhos, em termos de requisitos de interdependência, possam ser inequívocas, de modo a responder mais eficazmente aos novos desafios colocados no âmbito da globalização da produção. Para tal, fornece um conjunto consistente de termos e definições, estabelece 14 regras que asseguram uma interpretação clara dos requisitos estabelecidos e introduz, pela primeira vez, o requisito de reciprocidade  $\textcircled{R}$ .

## 8.8 Referências

- [B1] – BOULANGER, J. – *Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface* [Em linha]. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, B 7010. Paris: France. 1991. 27 p. [Consult. 5 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[ftp://80.14.158.64/2.Documents/2.3.Documents\\_Techniques/2.3.7.Les%20Techniques%20de%20l'ingenieur/B%20et%20C/B7010.pdf](ftp://80.14.158.64/2.Documents/2.3.Documents_Techniques/2.3.7.Les%20Techniques%20de%20l'ingenieur/B%20et%20C/B7010.pdf)>.
- [B2] – BOURDET, P.; SCHNEIDER, F. – *Spécification Géométrique des Produits. Cotation et tolérancement ISO*. Paris.: Dunod, 2007. ISBN 978-2-10-006919-4.
- [G1] – GOOLDY, G. – *Geometric Dimensioning & Tolerancing*. Rev. ed. USA.: Prentice-Hall, 1995. ISBN 0-13-398959-3.
- [G2] – GOOLDY, G. – *Dimensioning, Tolerancing, and Gaging Applied*. Rev. ed. USA.: Prentice-Hall, 1999. ISBN 0-13-791600-0.
- [H1] – HENZOLD, H. – *Geometrical Dimensioning And Tolerancing for Design, Manufacturing And Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. 2ª ed. U.K.: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 978-0-7506-67388
- [H2] – HUMIENNY, Z. – *State of Art in Standardization in GPS Area*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2009; v.2, p. 1-7.
- [H3] – HUMIENNY, Z.; BERTA, M. – *New multimedia geometrical tolerancing course*. 12 th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing. Procedia CIRP 10 (2013) p. 312–316.



- [K1] – KRULIKOWSKI, A. – *Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing*. 2ª ed. USA: Delmar Publishers edition, 1998. ISBN 0-8273-7995-1.
- [M1] – MEADOWS, J. D. – *Receiver Gages – Go Gages and Functional Gages*. In DRAKE, Jr, P. J. – *Dimensioning and Tolerancing Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1999, cap. 19, p. 1-20. ISBN 0-07-018131-4.
- [S1] – SCHNEIDER, F. – *Tolérancement Géométrique: Interprétation* [Em linha]. IUFM de Lorraine. Metz: Université de Metz. 2005. 106 p. [Consult. 15 jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL:<http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/sti/genimeca/zip/GPS/tol%E9rancement%2004-05.pdf>>.
- [S2] – SILVA, D. C.; PASIN, A. O.; MARQUES, L. H. – *Curso Básico de GD&T EMBRAER: Segundo a norma ASME Y14.5M-1994 (NE 03-073)*. Projeto Análise de Tolerância. Embraer. Rev. B. Março de 2003.

### 8.8.1 Normalização

- ASME Y14.5.1M-1994 (R 2004) – Mathematical Definition of Dimensioning and Tolerancing Principles. ASME.
- ASME Y14.5-2009 – Dimensioning and Tolerancing – Engineering Drawing and Related Documentation Practices. ASME.
- GE40-040N:1994 – Guide d'aide au tolérancement et à la mesure des écarts géométriques. CNOMO.
- ISO 286-1:2010+Cor.1:2013 – Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. ISO.
- ISO 1101:2012+Cor.1:2013 – Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
- ISO 1938-1:2015 – Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional measuring equipment – Part 1: Plain limit gauges of linear size. ISO.
- ISO 2692:2014 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Maximum material requirement (MMR), least material requirement (LMR) and reciprocity requirement (RPR). ISO.
- ISO 2692:1988+Amd.1:1992 – Technical drawings – Geometrical tolerancing – Maximum material principle + Amd. 1: Least material requirement. ISO (revista pela ISO 2692:2006).
- ISO/DIS 5458.2:2016 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Positional and pattern tolerancing. ISO.
- ISO 5459:2011 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum-systems. ISO.
- ISO 5459:1981 – Technical drawings – Geometrical tolerancing – Datums and datum-systems for geometrical tolerances. ISO (revista pela ISO 5459:2011).
- ISO 8015: 2011 – Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals – Concepts, principles and rules. ISO.
- ISO 10579: 2010 + Cor 1: 2011 – Geometrical product specifications (GPS) – Dimensioning and tolerancing – Non-rigid parts. ISO.
- ISO 14405-1:2016 – Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing -- Part 1: Linear sizes. ISO.

#### 8.44 Visão geral sobre a linguagem ISO de especificação técnica de produtos

---

- |                   |   |
|-------------------|---|
| ISO 14660-2: 1999 | – Geometrical Product Specification (GPS) – Geometrical features – Part 2: Extracted median line of a cylinder and cone, extracted median surface, local size of an extracted feature. ISO (anulada e substituída pela ISO 17450-3:2016). |
| STD 835:1999      | – Geometrical tolerances – Drawings in other systems than UG – Maximum material principle. SAAB.  |
| STD 112-0001:2002 | – Geometrical tolerances – Maximum material principle. VOLVO.   |

---

# **CAPÍTULO 9**

## **Tolerâncias gerais**



## Capítulo 9

### Tolerâncias gerais

#### 9.1 Introdução

A documentação técnica de produtos (nela incluindo os vários tipos de desenhos técnicos) serve de base para a interpretação de contratos e a documentação de especificação geométrica de produtos (GPS), nomeadamente os desenhos de definição de produto acabado (também designados como desenhos de detalhe), pode ser vista como a base de um contrato firme, estabelecido a nível industrial.

Neste âmbito, o desenho é definitivo. Todas as especificações devem ser indicadas no desenho, através da utilização de simbologia GPS, de regras por omissão ou especiais associadas e de referências a documentação afim. Logo, não podem ser impostos quaisquer outros requisitos não especificados no desenho.

No entanto, uma inscrição direta, no desenho, de todas as tolerâncias dimensionais e geométricas, adequadas aos diferentes elementos constituintes de uma peça, daria origem a documentos em que as especificações geométricas funcionalmente determinantes perderiam importância, no meio de um número excessivo de indicações relativas a elementos com requisitos facilmente assegurados pelos padrões de exatidão normalmente atingidos em processos de construção corrente.

Para ultrapassar esta limitação, foi introduzido o conceito de “**tolerâncias gerais**”. Os requisitos dimensionais e geométricos respeitantes aos elementos da peça com menor relevância funcional devem ser especificados indiretamente, no desenho, através da indicação, no interior ou junto da legenda, das classes de tolerância relativas aos diferentes processos de fabricação utilizados para a obtenção do produto final, em conformidade com os respetivos documentos normativos.

Este conceito começou por ser introduzido apenas para as tolerâncias dimensionais, entre as décadas de cinquenta e setenta do século passado, com a publicação de documentos normativos tais como a DIN 7168:1956, a NP 265:1962, a ISO 2768:1973, a NF E 02-350:1977 e a ANSI B4.3:1978, numa época em que o toleranciamento dimensional era ainda a principal ferramenta de especificação utilizada na generalidade dos desenhos de definição de produtos, em conjunto com a consideração do “Princípio de Taylor” (atual “requisito de envolvente”) como princípio de toleranciamento, segundo o qual, por omissão, os desvios geométricos de forma e de orientação (paralelismo) são limitados pelo toleranciamento dimensional.

Na década de oitenta, com a introdução do princípio de independência como princípio fundamental de toleranciamento (ISO 8015:1985), em que cada requisito dimensional e geométrico deve ser indicado e respeitado de modo independente, a menos que tenha sido especificada uma relação particular entre eles, o conceito de “**tolerâncias gerais**” foi alargado às tolerâncias geométricas, com a publicação de documentos normativos tais como a DIN 7168-2:1979 e a ISO 2768-2:1989, de modo a manter a legibilidade e a facilitar a interpretação dos desenhos.

A elaboração de documentos normativos sobre tolerâncias gerais, específicas dos diferentes processos de fabricação, começou por incidir sobre os processos de corte por arranque de apara, mas rapidamente passou a abranger outros processos, tais como, fundição, conformação plástica, moldação de plásticos, borracha, etc. Uma consulta rápida dos catálogos de alguns dos Organismos de normalização nacionais e internacionais, mais relevantes, permitiu identificar um número significativo de documentos normativos, atualmente em vigor neste domínio, que estão listados no quadro 9.1.

Quadro 9.1 – Documentos normativos sobre tolerâncias gerais específicas de diferentes processos de fabricação

Normas ISO		ISO
ISO 1307: 2006	Rubber and plastics hoses – Hose sizes, minimum and maximum inside diameters, and tolerances on cut-to-length hoses (EN ISO 1307:2008 IDT)	
ISO 2768-1: 1989	General tolerances – Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications (EN 22768-1:1993 IDT)	
ISO 2768-2: 1989	General tolerances – Part 2: Geometrical tolerances for features without individual tolerance indications (EN 22768-2:1993 IDT)	
ISO 3302-1: 1996	Rubber — Tolerances for products — Part 1: Dimensional tolerances	
ISO 3302-2: 2008	Rubber — Tolerances for products — Part 2: Geometrical tolerances	
ISO 8062-3: 2007	Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts – Part 3: General dimensional and geometrical tolerances and machining allowances for castings (EN ISO 8062-3:2007 IDT)	
ISO 9013: 2002	Thermal cutting – Classification of thermal cuts – Geometrical product specification and quality tolerances (EN ISO 9013:2002 IDT)	
ISO 10110-11: 1996	Optics and photonics – Preparation of drawings for optical elements and systems – Part 11: Non-toleranced data	
ISO 13583-1:2000	Centrifugally cast steel and alloy products — Part 1: General testing and tolerances]	
ISO 13920: 1996	Welding – General tolerances for welded constructions – Dimensions for lengths and angles – Shape and position (EN ISO 13920:1996 e NP EN ISO 13920:2005 IDT)	
Normas EN		CEN
EN 586-3:2001	Aluminium and aluminium alloys - Forgings - Part 3: Tolerances on dimensions and form	
EN 755-3:2008	Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 3: Round bars, tolerances on dimensions and form	
EN 755-4:2008	Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 4: Square bars, tolerances on dimensions and form	
EN 755-5:2008	Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 5: Rectangular bars, tolerances on dimensions and form	
EN 755-6:2008	Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 6: Hexagonal bars, tolerances on dimensions and form	
EN 755-7:2008	Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 7: Seamless tubes, tolerances on dimensions and form	
EN 755-8:2008	Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 8: Porthole tubes, tolerances on dimensions and form	
EN 755-9:2008	Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 9: Profiles, tolerances on dimensions and form	
EN 10243-1:1999	Steel die forgings – Tolerances on dimensions – Part 1: Drop and vertical press forgings	

(continua)

Quadro 9.1 – Documentos normativos sobre tolerâncias gerais específicas de diferentes processos de fabricação (conclusão)

<b>Normas EN</b>		CEN
EN 10243-2:1999	Steel die forgings – Tolerances on dimensions – Part 2: Upset forging made on horizontal forging machines	
EN 12420:1999	Copper and copper alloys - Forgings	
<b>Normas ANSI</b>		ANSI
ANSI/ASME B4.3-1978 (R2004) General Tolerances for Metric Dimensioned Products		
<b>Normas DIN</b>		DIN
DIN 6129-1: 2008	Means of packaging – Bottles and hollow-ware from glass – Part 1: General tolerances for automatic produced bottle	
DIN 6930-2: 2011	Stamped steel parts – Part 2: General tolerances	
DIN 6935: 2011	Cold bending of flat rolled steel	
DIN 7715-1: 1977	Rubber products; dimensional tolerances, ebonite products	
DIN 7715-5:1979	Rubber products; dimensional tolerances, rubber sheets and products made from sheets	
DIN 9830:2011	Burr heights on stamped parts	
DIN 16742:2013	Plastics moulded parts – Tolerances and acceptance conditions; Text in German and English	
DIN 16941:2012	Thermoplastics extruded profiles – General tolerances of size, form and orientation	
DIN 28005-1: 2011	Tolerances for vessels – Part 1: Vessels of metallic materials	
DIN 28005-2: 2001	General tolerances for vessels – Part 2: Glass lined vessels	
DIN 28006-1: 2009	Tolerances for agitator vessels – Part 1: Agitator vessels of metallic materials	
DIN 28006-2: 2001	General tolerances for agitator vessels – Part 2: Glass lined agitator vessels	
DIN 28007-1: 2009	Tolerances for columns – Part 1: Columns of metallic materials	
DIN 28007-2: 2001	General tolerances for columns – Part 2: Glass lined columns	
DIN 40680-1: 1983	Ceramic components for electrical purposes; admissible tolerances	
DIN 40680-2: 1983	Ceramic components for electrical purposes; form tolerances	
<b>Normas NF</b>		AFNOR
E 02-351: 1993	Tolérances générales - Tolérances géométriques pour éléments non affectés de tolérances individuelles - Guide d'application de la norme NF EN 22768-2	
NF E 02-352: 2013	Spécification géométrique des produits (GPS) – Tolérances générales (dimensionnelles et géométriques) pour pièces découpées pliées	
NF E 02-353: 2001	Spécification géométrique des produits (GPS) – Pièces repoussées – Tolérances dimensionnelles et de planéité pour dimensions et éléments non affectés de tolérances individuelles	
NF T 58-000: 1987	Plastiques – Tolérances applicables aux pièces moulées en plastiques (thermodurcissables et thermoplastiques)	
<b>Normas SN</b>		SNV
SN 277012: 1982	Plastics – Tolerances for Compression and Injection Mouldings.	

A consulta dos documentos normativos DIN 30630 e Bosch-Norm 4 497 026 418 ajuda a complementar esta visão de conjunto sobre a utilização do conceito de “tolerâncias gerais” em peças obtidas através de diferentes processos de fabricação.

Atualmente, a Organização Internacional de Normalização (ISO), no âmbito da apresentação do seu modelo de matriz de normas no domínio GPS (ISO 14638), identifica, ao nível da matriz de normas GPS complementares, algumas cadeias de normas com requisitos específicos de peças resultantes de diferentes processos de fabricação (ver quadro 9.2). O número de processos considerado é limitado. Algumas destas cadeias estão apenas cobertas parcialmente por normas relevantes e outras ainda não começaram a ser desenvolvidas, ao nível da ISO, não contendo qualquer norma.

Quadro 9.2 – Cadeias de normas com requisitos específicos de processos de fabricação identificados no âmbito da norma ISO 14638

Matriz de normas GPS complementares	
Cadeias de normas GPS complementares	
<b>A. Normas com requisitos específicos de processos de fabricação</b>	
A.1	A cadeia Trabalho mecânico (corte por arranque de apara)
A.2	A cadeia Fundição
A.3	A cadeia Soldadura
A.4	A cadeia Corte térmico
A.5	A cadeia Moldação de plásticos
A.6	A cadeia Revestimento metálico e inorgânico
A.7	A cadeia Pintura

No entanto, o conceito de “tolerâncias gerais” continua em desenvolvimento, no seio da ISO, com a revisão de alguns documentos normativos existentes e a preparação e edição de novas normas no âmbito de processos de fabricação que não tinham ainda sido cobertos.

## 9.2 Conceitos relativos ao toleranciamento geral de características geométricas

No desenho de definição de uma peça qualquer, todos os elementos geométricos constituintes deverão ter as suas formas e as suas dimensões completamente toleranciadas com **tolerâncias individuais**, para os elementos funcionais importantes, e com **tolerâncias gerais**, para os outros elementos em que a “**exatidão de construção corrente**”, obtida através de processos de corte por arranque de apara, fundição, soldadura, etc., seja suficiente.

**A especificação geométrica num desenho deverá ser completa**, a fim de assegurar que os aspetos dimensionais e geométricos de todos os elementos estejam limitados; isto é, **nada deverá ser deixado ao critério do pessoal da produção ou do serviço de controlo de qualidade**.

A utilização de “tolerâncias gerais”, indicadas no interior ou junto à legenda do desenho, simplifica a tarefa de assegurar o cumprimento deste pré-requisito, possibilitando que as dimensões e as geometrias, sem importância funcional, sejam representadas nos desenhos apenas pelas suas características nominais (ver exemplo na figura 9.1).

O **conceito de “toleranciamento geral”** de características dimensionais e geométricas tem vindo a ser desenvolvido no âmbito da Organização Internacional de Normalização (ISO), com base nas considerações a seguir expostas (ver ISO 2768 e ISO 8062-3).

As tolerâncias gerais deverão ser indicadas no desenho, através de referências às normas apropriadas aos casos em apreço. Os valores das tolerâncias gerais correspondem às classes ou graus de exatidão corrente das unidades de produção (oficinas, fundições, etc.), sendo a classe e/ou o grau de tolerância apropriado(s) escolhido(s) e indicado(s) no desenho (ver figura 9.1).



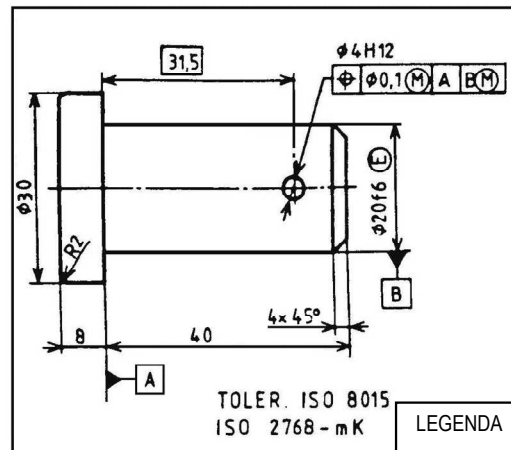


Figura 9.1 – Desenho de definição com especificação de tolerâncias gerais relativas a processos de corte por arranque de apara (ISO 2768). Adaptada de [S4]

A partir de certos valores de tolerância, que correspondem à exatidão corrente das unidades de produção, não há, normalmente, qualquer vantagem económica, ao nível da fabricação, em alargar a tolerância (ver figura 9.2). Em geral, o parque de máquinas e as capacidades normais da produção não dão origem a elementos com desvios superiores. Logo, a especificação de tolerâncias superiores não teria qualquer interesse para a empresa em questão.

Contudo, se, por razões funcionais, um elemento necessitar de uma tolerância com um valor inferior ao das “tolerâncias gerais”, essa tolerância deverá ser indicada individualmente, junto do elemento respetivo. Este tipo de tolerância sai fora do âmbito das tolerâncias gerais.

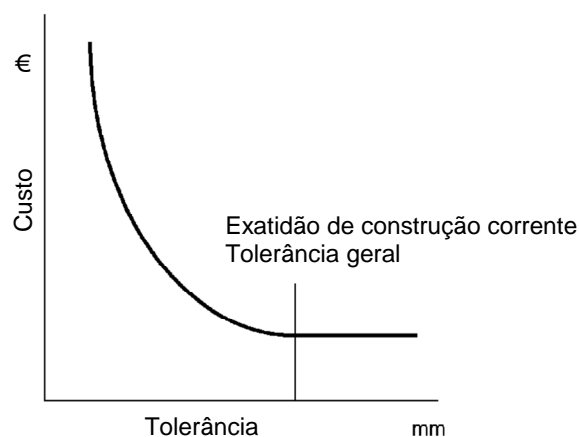


Figura 9.2 – Função custo / valor da tolerância. Adaptada de [H1]

Deste modo, quando a função de um elemento admite uma tolerância igual ou superior aos valores do toleranciamento geral, em princípio, tal não deverá ser indicado individualmente no desenho, considerando-se que já está abrangido pela especificação das “tolerâncias gerais” adequadas, de acordo com o indicado nas secções 9.3.4, 9.4.6 e 9.5.3 deste texto. Este tipo de procedimento permite uma utilização plena do **conceito de “tolerâncias gerais”**. No entanto, podem existir “exceções à regra”, quando a função do elemento admite uma tolerância superior às tolerâncias gerais e, em acréscimo, essa tolerância mais larga permite uma economia no âmbito da fabricação.

Nesses casos especiais, deverá ser especificada individualmente uma tolerância mais larga, junto do elemento em questão, tal como, por exemplo, no caso da profundidade de furos cegos realizados durante uma montagem ou da tolerância de circularidade de um casquilho grande e fino.

No contexto descrito, a utilização do **conceito de “tolerâncias gerais”** apresenta as seguintes vantagens:

- a) os desenhos são mais fáceis de ler e, por conseguinte, a comunicação torna-se mais eficaz para o utilizador do desenho;
- b) o desenhador poupa tempo, evitando a realização de cálculos detalhados de tolerâncias, já que basta saber se a função admite uma tolerância maior ou igual à tolerância geral;
- c) o desenho permite identificar, facilmente, quais os elementos que podem ser produzidos por via da capacidade normal do processo, o que facilita também a gestão do sistema de qualidade, através de uma redução dos níveis de controlo;
- d) os elementos restantes que são afetados por **tolerâncias individuais** serão, normalmente, aqueles para os quais a função requer tolerâncias relativamente apertadas e que podem, portanto, necessitar de esforços particulares durante a produção – este facto será útil para os serviços de planeamento da produção e de controlo de qualidade, na sua análise dos requisitos de controlo;
- e) os responsáveis pelos serviços de compras e de subcontratação podem negociar os contratos mais facilmente, uma vez que a **“exatidão de construção corrente”** é conhecida, antes do contrato ter sido adjudicado; esta circunstância evita, igualmente, as discussões entre o cliente e o fornecedor, no momento da entrega, uma vez que, desse ponto de vista, o desenho fornecido é completo.

Estas vantagens só são plenamente atingidas quando existe uma confiança suficiente de que as tolerâncias dimensionais e geométricas gerais (e as sobre-espessuras para trabalho mecânico, em peças fundidas) não serão ultrapassadas, isto é, quando a exatidão de construção corrente, da unidade de produção em questão, é igual ou superior à das tolerâncias gerais indicadas no desenho.

Logo, **a unidade de produção** deverá:

- i) determinar, por meio de medições, qual a sua exatidão de construção corrente (ver exemplo na secção 9.3.3 deste texto);
- ii) aceitar apenas os desenhos cujas tolerâncias gerais sejam maiores ou iguais à sua exatidão de construção corrente;
- iii) verificar, por amostragem, que a sua exatidão de construção corrente não se deteriora (já que a intenção do conceito de “toleranciamento geral” não é a de obrigar à verificação de todos os elementos em cada peça).

Com o conceito de “tolerâncias gerais”, deixa de ser necessário basear o trabalho de especificação numa “boa construção” não definida, com todas as incertezas e mal-entendidos inerentes. **As “tolerâncias gerais” definem a exatidão requerida.**

A tolerância permitida pela função é, frequentemente, maior do que a respetiva tolerância geral, daí resultando que a função da peça nem sempre é afetada, quando a tolerância geral é (ocasionalmente) ultrapassada, num dos elementos da peça. A ultrapassagem da tolerância geral apenas deverá conduzir à rejeição da peça, se a função for afetada.

Não é objetivo do conceito de “tolerâncias gerais” promover a verificação de cada uma das tolerâncias gerais em todas as peças, uma vez que é improvável que essas tolerâncias venham a ser excedidas.

Apesar das vantagens atrás descritas, alguns autores, como Schneider [S1], consideram que estas normas não têm um carácter técnico, uma vez que a sua vocação não é permitir que um produto seja de boa qualidade, já que o seu fundamento parece ser, sobretudo, administrativo, de modo a assegurar que todos os elementos estejam completamente especificados, mesmo que, eventualmente, de um modo mais ou menos arbitrário.

Nas secções seguintes deste texto, apresentam-se os sistemas de “tolerâncias gerais” relativos a alguns dos processos de fabricação de utilização mais generalizada; faz-se referência aos procedimentos que levaram ao estabelecimento dos valores normalizados das tolerâncias e dão-se algumas informações com vista à adoção das classes e/ou graus de exatidão em alguns casos correntes.

Nos desenhos de peças obtidas através de uma sequência de processos de fabricação (moldação ou construção soldada e posterior corte por arranque de apara, por exemplo), deve ser feita referência às normas que especificam as tolerâncias gerais relativas a esses processos (isto é ISO 8062-3 ou ISO 13920 e ISO 2768, nos exemplos referidos). Nestes casos, em dimensões lineares e angulares sem indicações de tolerâncias individuais, entre duas superfícies obtidas por meio de diferentes processos de fabricação, deve utilizar-se a norma correspondente que especifica a maior das duas tolerâncias gerais para cada caso em apreço. Também em caso de dúvida, sobre o modo de obtenção de uma dada dimensão nominal linear ou angular, deverá ser utilizado o documento normativo que prescreve a maior tolerância.

As dimensões lineares e angulares, objeto de tolerâncias gerais, têm desvios admissíveis simétricos ( $\pm t_D/2$  e  $\pm 4\alpha$ ) em relação ao seu valor nominal, pois foi verificado pela experiência e através de estudos estatísticos que os níveis da exatidão oficial correntes se desviam igualmente para cada lado da dimensão nominal, de modo que esta é também a dimensão média do intervalo de tolerância. Em termos das dimensões lineares, tal corresponde às posições JS (furos) e js (veios) do intervalo de tolerância, no sistema ISO de tolerâncias (ISO 286-1).

### 9.3 Tolerâncias gerais para peças obtidas através de processos de corte por arranque de apara (ISO 2768)

#### 9.3.1 Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicações de tolerâncias individuais

A Parte 1 da norma ISO 2768 especifica tolerâncias dimensionais gerais para peças obtidas por processos de corte por arranque de apara (*"material removal processes"*), ver exemplos na figura 9.3, ou por conformação plástica de chapas metálicas (*"sheet metal forming"*), quando, neste último caso, não existam outras normas relevantes. Estas tolerâncias poderão também ser adequadas para utilização em peças de materiais não metálicos.

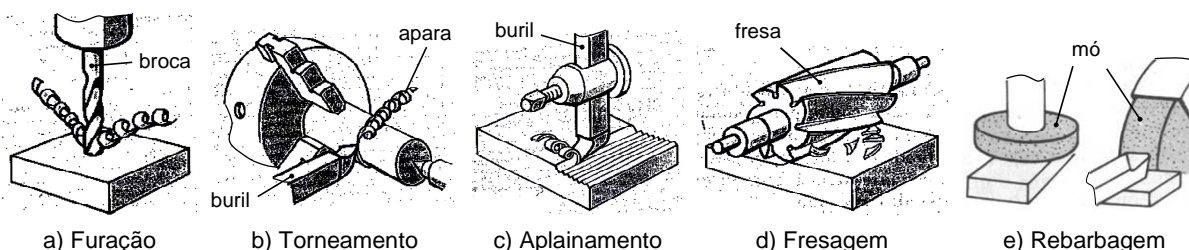


Figura 9.3 – Exemplos de processos de corte por arranque de apara

Nos desenhos que fazem referência à **norma ISO 2768-1**, as tolerâncias para as dimensões sem indicações de tolerâncias individuais podem ser especificadas segundo quatro classes de tolerância (ver quadro 9.3): **f** (fina), **m** (média), **c** (grosseira) e **v** (muito grosseira).

Esta norma aplica-se, exclusivamente, às seguintes dimensões sem indicações de tolerâncias individuais:

- a) dimensões lineares (tamanhos, distâncias, raios e chanfros);
- b) dimensões angulares, incluindo as indicadas implicitamente, tais como ângulos retos (90°), a menos que seja feita referência à norma ISO 2768-2, ou ângulos de polígonos regulares;
- c) dimensões lineares e angulares obtidas por trabalho mecânico (*"by machining"*) de peças montadas.

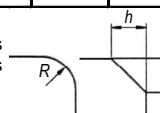
Por outro lado, esta norma não se aplica às seguintes dimensões:

- a) dimensões lineares e angulares cujas tolerâncias gerais sejam definidas através de referência a outras normas de tolerâncias gerais, por exemplo: ISO 8062-3, ISO 13920, etc.;
- b) dimensões auxiliares, indicadas entre parêntesis, por exemplo: (50);
- c) dimensões teoricamente exatas, indicadas enquadradas, por exemplo:  $\boxed{\varnothing 40}$ .

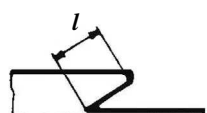
Os valores das tolerâncias dimensionais lineares  $T_D$  e angulares  $T_\alpha$  estão indicados, no quadro 9.3, em termos dos respectivos desvios admissíveis simétricos ( $\pm t_D/2$  e  $\pm \Delta_\alpha = \pm T_\alpha/2$ ), para cada uma das

quatro classes de tolerância previstas. Os valores das tolerâncias dimensionais lineares são diretamente proporcionais às respectivas dimensões nominais. No caso das tolerâncias dimensionais angulares, os seus valores estão indicados em função do comprimento  $l$  do lado mais curto do ângulo  $\alpha$  considerado, constatando-se que a tolerância diminui com o aumento daquele comprimento.

Quadro 9.3 – Tolerâncias dimensionais gerais para peças obtidas por corte por arranque de apara (ISO 2768-1)

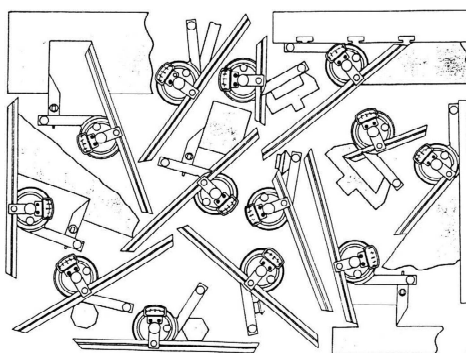
Desvios admissíveis $\pm t_D/2$ e tolerâncias para dimensões lineares $T_D = t_D$									Valores em mm		
Classe de tolerância	Intervalos de dimensões nominais								Classe de tolerância	Interv. dimensões nom.	
	$\geq 0,5$ até 3	$> 3$ até 6	$> 6$ até 30	$> 30$ até 120	$> 120$ até 400	$> 400$ até 1000	$> 1000$ até 2000	$> 2000$ até 4000		$\geq 0,5$ até 3	$> 3$ até 6
Fina <b>f</b>	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	---	<b>f e m</b>	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$
Média <b>m</b>	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 2$	<b>c e v</b>	$\pm 0,4$	$\pm 1$
Grosseira <b>c</b>	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$	Valores para alturas de chanfros $h$ e raios exteriores $R$ . 		
Muito grosseira <b>v</b>	---	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 8$			

**Nota:** Para dimensões  $< 0,5$  mm, os desvios devem ser indicados, no desenho, em conjunto com a dimensão nominal correspondente.

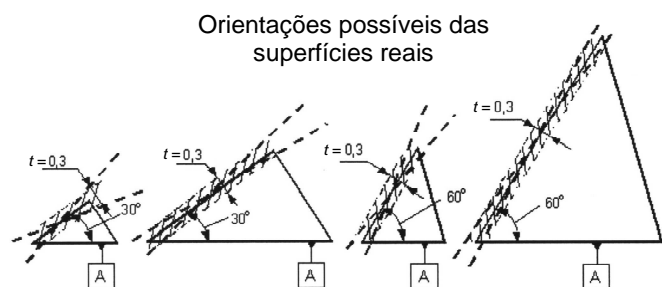
Desvios admissíveis $\pm \Delta_\alpha$ e tolerâncias para dimensões angulares $T_\alpha = 2 \Delta_\alpha$						Valores em °	
Classe de tolerância	Intervalos de comprimentos nominais $l$						
	$\leq 10$	$> 10$ até 50	$> 50$ até 120	$> 120$ até 400	$> 400$		
Fina e média <b>f e m</b>	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 5'$	Os desvios angulares são especificados em função do comprimento $l$ , em mm, do lado mais curto do ângulo considerado. 	
Grosseira <b>c</b>	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 15'$	$\pm 0^\circ 10'$		
Muito grosseira <b>v</b>	$\pm 3^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$		

Este procedimento pode ser justificado [T1]:

- considerando que as dificuldades de fabricação e de verificação dimensional aumentam com a diminuição do comprimento das superfícies do diedro que contactam com as ferramentas e com os instrumentos de medição [ver figura 9.4 a)] e,
- admitindo que cada classe de tolerância angular pode ser caracterizada por meio de uma zona de tolerância de largura  $t$ , no interior da qual deve estar compreendida cada superfície do diedro, constata-se que a correspondente tolerância angular  $\pm$  está dependente do comprimento do lado do ângulo e não do valor do próprio ângulo [ver figura 9.4 b)].



a) Verificação de ângulos com lados de comprimentos diferentes



b) Variação da tolerância angular  $\pm$  em função do comprimento dos lados dos ângulos

Figura 9.4 – Exemplos que justificam a especificação de valores de tolerâncias angulares em função do comprimento do lado mais curto do ângulo considerado

As **tolerâncias gerais especificadas em unidades angulares** controlam apenas a orientação geral relativa entre as linhas das duas superfícies (integrais) reais, em qualquer uma das secções retas do diedro, mas não os seus desvios de forma. Esta orientação geral é definida através da orientação das linhas retas em contacto, de forma geometricamente perfeita. A distância máxima entre as linhas em contacto e as linhas da superfície real deve ser mínima (ver ISO 8015:1985).

Os valores das tolerâncias dimensionais lineares gerais, indicados no quadro 9.3, correspondem, em termos médios, aos seguintes graus de tolerância internacional (IT) do sistema ISO de tolerâncias (ISO 286-1):

Classe de tolerância fina	<b>f</b>	≈ IT12	(desvios admissíveis $\pm \frac{1}{2}$ IT12)
Classe de tolerância média	<b>m</b>	≈ IT14	(desvios admissíveis $\pm \frac{1}{2}$ IT14)
Classe de tolerância grosseira	<b>c</b>	≈ IT16	(desvios admissíveis $\pm \frac{1}{2}$ IT16)
Classe de tolerância muito grosseira	<b>v</b>	≈ IT17	(desvios admissíveis $\pm \frac{1}{2}$ IT17)

A especificação, no desenho de uma peça, de uma classe de tolerância para as dimensões lineares e angulares sem indicações de tolerâncias individuais deve ter em consideração a exatidão oficial corrente. As tolerâncias gerais especificadas não deverão ser maiores do que as asseguradas pela exatidão oficial corrente. Essa exatidão pode ser avaliada através de medições, de acordo com procedimentos idênticos aos descritos na secção 9.3.3, dependendo de fatores tais como a qualidade e o estado das máquinas-ferramenta e das ferramentas de corte normalmente disponíveis, o tipo de materiais a trabalhar, a qualificação e o desempenho corrente dos trabalhadores, etc.

Segundo Henzold [H1], normalmente, a exatidão oficial corrente em engenharia mecânica corresponde à classe média (**m**), especificada, por exemplo, na fabricação de turbinas, máquinas-ferramenta, engenharia mecânica fina, etc. Por sua vez, a norma ANSI B4.3 indica que as classes de exatidão fina (**f**) e média (**m**) são adequadas, sobretudo, para peças obtidas através de processos de corte por arranque de apra e que a classe grosseira (**c**) é passível de utilização em todos os tipos de dimensões.

A SNV-VSM [S5] estipula que a classe fina (**f**) só deve ser especificada em peças obtidas por processos de corte por arranque de apra e que as classes média (**m**) e grosseira (**c**) são adequadas para peças metálicas não sujeitas a corte por arranque de apra. A Bosch-Norm 4497026418 (nos domínios das tecnologias automóvel e industrial, da termotecnologia, dos eletrodomésticos, etc.) recomenda a classe média (**m**) para utilização preferencial em peças metálicas e também para chanfros e arredondados e dimensões angulares em peças plásticas obtidas por moldação e submetidas ou não a trabalho mecânico. Recomenda também a classe (**c**) para dimensões angulares em peças fundidas.

### 9.3.2 Tolerâncias geométricas para elementos sem indicações de tolerâncias individuais

A Parte 2 da norma ISO 2768 especifica tolerâncias geométricas gerais para peças obtidas por processos de corte por arranque de apra (*"material removal processes"*), ver exemplos na figura 9.3, embora possa também ser aplicada a elementos geométricos obtidos por outros processos de fabricação, desde que seja feito um controlo suplementar para determinar se, nesses casos, a exatidão oficial corrente está dentro dos limites prescritos por esta norma. Nos desenhos que fazem referência à **norma ISO 2768-2**, as tolerâncias geométricas para elementos sem indicações de tolerâncias individuais podem ser especificadas segundo três classes de tolerância: **H**, **K** e **L**.

A escolha de uma dada classe de tolerância deve ter em conta a exatidão oficial corrente. No caso de serem necessárias tolerâncias geométricas mais apertadas ou mais largas e mais económicas, para um elemento individual qualquer, estas deverão ser indicadas diretamente nos desenhos, em conformidade com a norma ISO 1101.

As **tolerâncias geométricas gerais** aplicam-se a todas as características geométricas de uma peça, excluindo a cilindridade, o perfil de uma linha, o perfil de uma superfície, a inclinação, a coaxialidade, a localização e o batimento total.

As tolerâncias geométricas gerais, apresentadas nos quadros 9.4 e 9.5, em conformidade com a **ISO 2768-2**, deverão ser sempre utilizadas quando o **princípio de independência** é o princípio fundamental de toleranciamento aplicado ao desenho. Os valores numéricos das tolerâncias, indicados nestes quadros, resultam sobretudo de medições efetuadas em peças que obedeciam ao toleranciamento dimensional geral ISO 2768-m (utilizadas na fabricação de turbinas, máquinas-ferramenta, engenharia mecânica fina, etc.), ao nível da indústria de diferentes países [H1], de acordo com o procedimento descrito sucintamente, na secção 9.3.3.

Quadro 9.4 – Tolerâncias geométricas gerais para elementos isolados em peças obtidas por processos de corte por arranque de apra

Tolerâncias gerais de forma		Valores em mm					
Características:		Intervalos de comprimentos nominais					
		Classe de tolerância	≤ 10	> 10 até 30	> 30 até 100	> 100 até 300	> 300 até 1000
1 – Retitude	$T_{-}$						
2 – Planeza	$T_{\square}$	H	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3
		K	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6
		L	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2
3 – Circularidade	$T_{\bigcirc}$	A tolerância de circularidade $T_{\bigcirc} = T_D$ (mas sempre $T_{\bigcirc} \leq T_f$ ).					
4 – Cilindricidade	$T_{\parallel}$	Tolerâncias não especificadas. O desvio $E_{\parallel}$ de cilindridade tem 3 componentes: $E_{\bigcirc}$ das secções retas e $E_{-}$ e $E_{//}$ das geratrizes opostas da superfície cilíndrica. Logo, $T_{\parallel} = f(T_{\bigcirc}, T_{-}, T_{//})$ .					
5 – Perfil de uma linha $T_{\frown}$ e perfil de uma superfície $T_{\Delta}$		Tolerâncias não especificadas, pois estas características são utilizadas geralmente em casos funcionais especiais que excluem a especificação de tolerâncias gerais.					

Na utilização do quadro 9.4, relativo às tolerâncias geométricas gerais de forma, devem ser tidos em consideração os seguintes aspetos:

- a) No caso das tolerâncias gerais de **retitude**, os valores são escolhidos em função do comprimento nominal da linha correspondente, enquanto para a **planeza** baseiam-se no maior comprimento lateral da superfície ou no diâmetro, se a superfície for circular.

Nas medições de desvios geométricos efetuadas no seio das indústrias alemã, japonesa e britânica, os valores obtidos situaram-se dentro da classe de tolerância H, conforme se pode observar no gráfico de frequências da figura 9.5 [H1]. Os valores das tolerâncias das classes K e L são múltiplos dos da classe H e poderão ser adotados quando necessário.

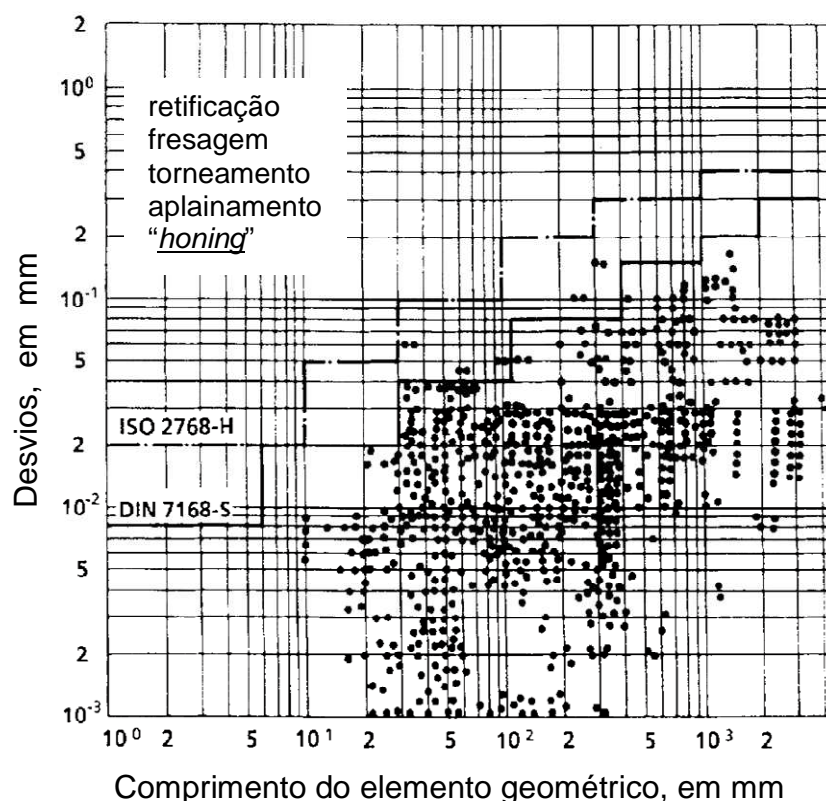


Figura 9.5 – Desvios de retitude medidos ao nível da indústria. Adaptada de [H1]

- b) A tolerância geral de **circularidade** é igual, em valor numérico, à tolerância dimensional ( $T_D$ ) do diâmetro da secção, mas não deve, em caso algum, ser superior ao valor correspondente da tolerância geral de batimento circular radial, indicado no quadro 9.5. Na figura 9.6, apresentam-se dois exemplos de aplicação deste conceito com as respectivas interpretações. No segundo exemplo, a peça c) com uma secção reta achatada só poderá preencher o requisito de circularidade especificado no desenho, se a amplitude de tamanhos verificada na peça for inferior ao valor da tolerância dimensional geral.
- c) Em termos de **cilindricidade**, deve ter-se em conta que o valor do efeito combinado dos desvios de circularidade, de retitude e de paralelismo das geratrizes opostas da superfície cilíndrica, componentes do desvio de cilindridade, é, por razões geométricas, inferior à soma



das suas tolerâncias, uma vez que existe também uma certa limitação introduzida pela tolerância dimensional. Contudo, se, por razões funcionais, o desvio de cilindridade tiver de ser inferior a esse efeito combinado, deve especificar-se uma tolerância individual de cilindridade para o elemento em questão. Por vezes, no caso de uma superfície para ajustamento, é suficiente a indicação do requisito de envolvente **E**.

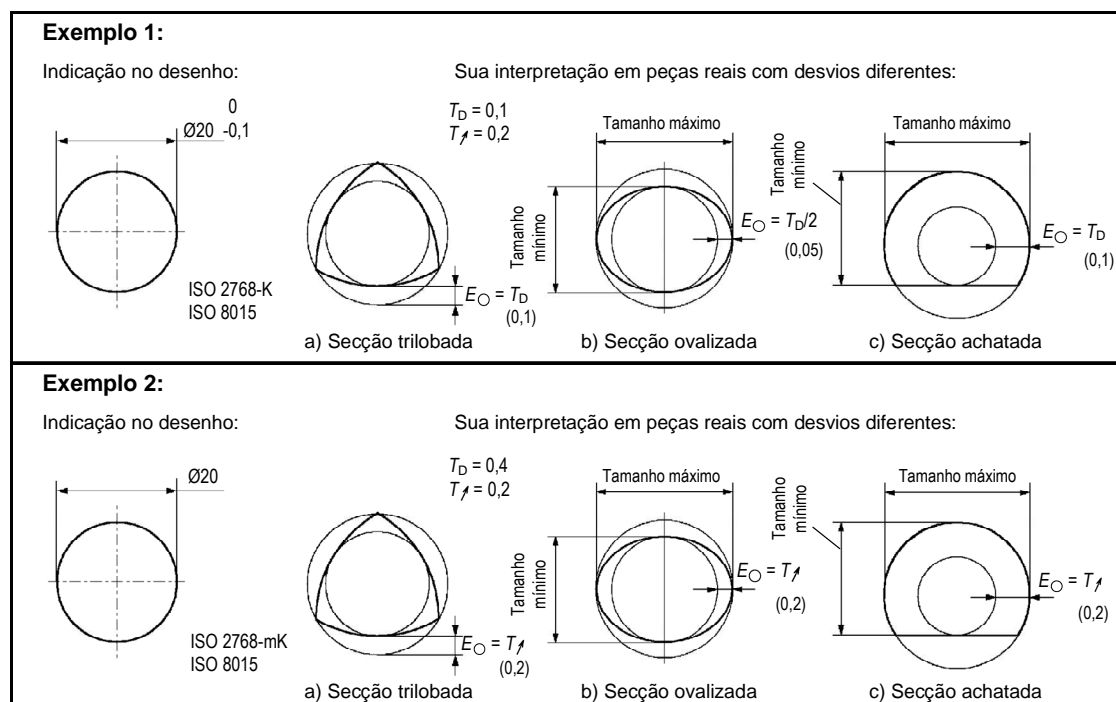


Figura 9.6 – Exemplos de especificações de tolerâncias gerais de circularidade

Na utilização do quadro 9.5, relativo às tolerâncias geométricas gerais para elementos correlacionados, devem ser tidos em consideração os seguintes aspetos:

- a) Nas tolerâncias geométricas gerais de orientação, posição e batimento, os elementos de referência usados para o estabelecimento de referências especificadas devem poder ser identificados sem a necessidade de qualquer indicação no desenho. A tolerância é aplicada ao elemento mais curto utilizando-se o elemento mais comprido para o estabelecimento da **referência especificada**. Este procedimento permite considerar, conformes com a especificação, peças que apresentam desvios angulares, entre os elementos, maiores do que os que seriam admitidos com o procedimento contrário (ver exemplo na figura 9.7).

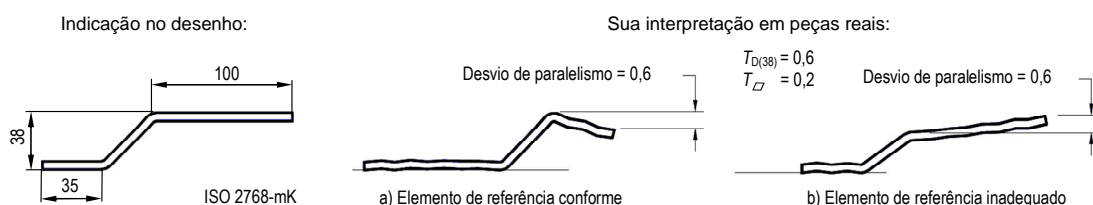


Figura 9.7 – Exemplo de uma tolerância geral de paralelismo entre duas superfícies: análise do efeito do elemento de referência considerado na verificação da conformidade da peça

Quadro 9.5 – Tolerâncias geométricas gerais para elementos correlacionados em peças obtidas por processos de corte por arranque de apra

Tolerâncias gerais de orientação, posição e batimento						
Características:		Valores em mm				
1 – Paralelismo	$T_{//}$	A tolerância de paralelismo $T_{//} = T_D$ (da distância entre os elementos) ou $T_{//} = T_{\square}/T_{-}$ (do menor dos elementos), tomando o maior destes valores.				
2 – Perpendicularidade	$T_{\perp}$	Classe de tolerância	Intervalos de comprimentos nominais dos lados mais curtos			
			$\leq 100$	$> 100$ até 300	$> 300$ até 1000	$> 1000$ até 3000
		H	0,2	0,3	0,4	0,5
		K	0,4	0,6	0,8	1
L	0,6	1	1,5	2		
3 – Inclinação	$T_{\angle}$	Tolerâncias não especificadas. Em sua substituição, poderão ser utilizadas tolerâncias gerais para dimensões angulares (ISO 2768-1).				
4 – Localização	$T_{\phi}$	Tolerâncias não especificadas. Em sua substituição, poderão ser utilizadas tolerâncias gerais para dimensões lineares (ISO 2768-1).				
6 – Coaxialidade	$T_{\odot}$	Tolerâncias não especificadas, mas num caso extremo $T_{\odot} = T_f$ .				
7 – Simetria	$T_{\equiv}$	Classe de tolerância	Intervalos de comprimentos nominais			
			$\leq 100$	$> 100$ até 300	$> 300$ até 1000	$> 1000$ até 3000
		H	0,5			
		K	0,6		0,8	1
L	0,6	1	1,5	2		
8 – Batimento circular	$T_f$	Classe de tolerância	Tolerâncias de batimento circular $T_f$		Tolerâncias de batimento circular radial, axial e em qualquer direção.  As superfícies de apoio devem ser tomadas como elementos de referência, se forem concebidas para tal.  Caso contrário, no batimento circular radial, o elemento mais comprido deve ser tomado para o estabelecimento da referência especificada.	
		H	0,1			
		K	0,2			
L	0,5					
Na verificação das tolerâncias gerais de elementos correlacionados, o elemento mais comprido deve ser tomado para o estabelecimento da <b>referência especificada</b> . Se os dois elementos tiverem o mesmo comprimento, qualquer um deles poderá ser considerado para o estabelecimento da referência especificada.						

- b) As tolerâncias gerais de **perpendicularidade** limitam também os desvios de retitude ou de planeza e os desvios de batimento circular axial dos elementos que formam o ângulo reto. Logo, a tolerância de perpendicularidade não deverá ser inferior às tolerâncias gerais de retitude (e planeza) e de batimento circular axial. Os valores indicados, no quadro 9.5, derivam de medições industriais, atrás referidas, em que os desvios contabilizados ficaram englobados na classe H.
- c) As tolerâncias gerais de **simetria** limitam também certos desvios de retitude ou de planeza, pelo que o seu valor não deverá ser inferior aos das tolerâncias gerais de retitude e planeza. As medições realizadas em peças, ao nível da indústria, revelaram que os desvios de simetria até 0,5 mm não dependem do comprimento do elemento (ver figura 9.8).

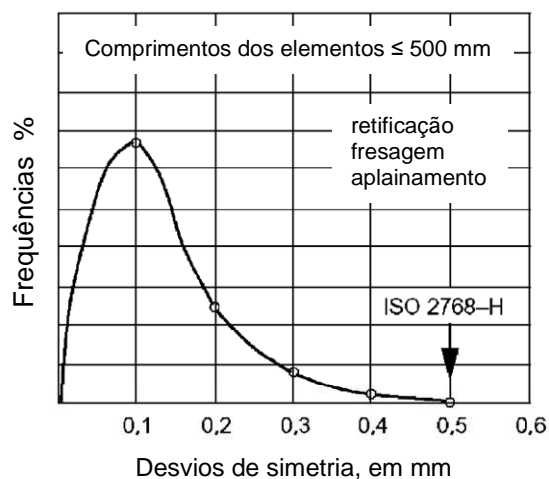


Figura 9.8 – Desvios de simetria medidos ao nível da indústria. Adaptada de [H1]

Os valores das tolerâncias gerais são estabelecidas com base nos maiores desvios medidos mas, de acordo com Henzold [H1], estes não são provavelmente devidos à inexactidão das máquinas-ferramenta mas sim à inexactidão do ajuste da peça nas máquinas, após o seu reaperto. Peças pequenas e grandes foram ajustadas com a mesma inexactidão e apresentaram a mesma distribuição dos desvios de simetria medidos.

As tolerâncias gerais de simetria aplicam-se quando, pelo menos, um dos elementos tem um plano mediano ou quando os eixos de revolução dos dois elementos em análise são perpendiculares entre si, ver exemplos na figura 9.9. Nestes exemplos, simula-se a escolha do elemento de referência, em função do maior dos comprimentos, e indica-se o comprimento nominal a considerar no estabelecimento do valor da tolerância geral de simetria.

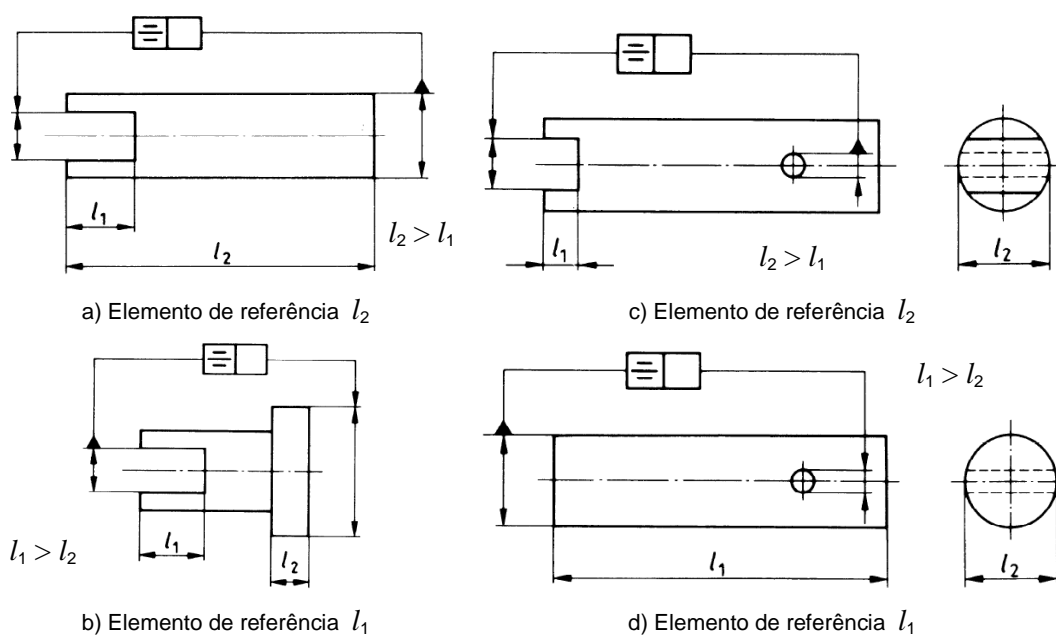


Figura 9.9 – Tolerâncias gerais de simetria: exemplificação dos elementos de referência a considerar na sua verificação (ISO 2768-2)

- d) Os valores das tolerâncias gerais de **batimento circular** (radial, axial e em qualquer direção) derivam também das medições, atrás referidas, realizadas em peças, a nível industrial. Os maiores desvios geométricos medidos situaram-se dentro da classe H (ver figura 9.10).

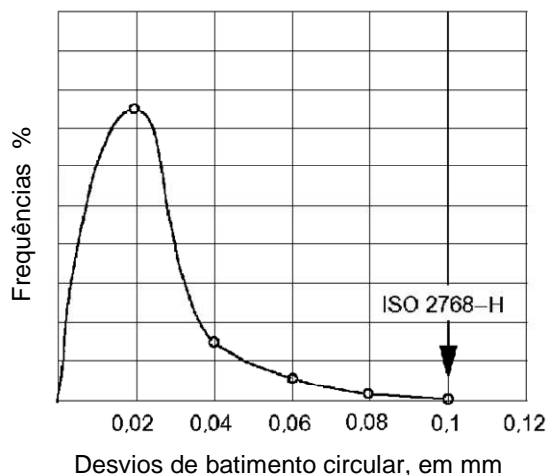


Figura 9.10 – Desvios de batimento circular medidos ao nível da indústria. Adaptada de [H1]

Segundo Henzold [H1], os desvios medidos não mostraram qualquer relação com o diâmetro ou o comprimento do elemento (diâmetros avaliados até 900 mm); com a tolerância do tamanho; com a rugosidade de superfície especificada e com o material (apenas foram avaliados materiais metálicos), tal como ficou provado, por exemplo, ao nível da indústria alemã, desde 1974. Provavelmente, estes desvios não são devidos à inexatidão das máquinas-ferramenta mas antes à inexatidão do ajuste da peça nas máquinas, após a realização do seu reaperto. Geralmente, durante esta operação, a peça é medida onde, normalmente, se detetam os desvios maiores (por exemplo, no diâmetro exterior). Logo, peças pequenas e peças grandes são ajustadas com a mesma inexatidão.

Normalmente, em termos de tolerâncias geométricas gerais, a exatidão oficial corrente em engenharia mecânica corresponde à classe **H**, especificada, por exemplo, na fabricação de turbinas, máquinas-ferramenta, engenharia mecânica fina, etc. Os valores das tolerâncias das classes **K** e **L** são múltiplos dos da classe **H** e poderão ser adotados sempre que necessário, [H1]. O documento Bosch-Norm 4497026418 recomenda também a classe **H** para utilização preferencial em peças metálicas produzidas através de corte por arranque de apara e também para peças de plástico obtidas por moldação e submetidas a posterior trabalho mecânico.

### 9.3.3 Exemplo de procedimento de medição para a determinação da exatidão oficial corrente

As vantagens da utilização do conceito de “tolerâncias gerais”, em desenhos de definição, só são plenamente atingidas quando as unidades de produção conhecem a sua exatidão oficial corrente, determinada a partir de uma recolha sistemática de dados relativos a medições de características

dimensionais e geométricas efetuadas em peças da sua produção corrente, obtidas sem a utilização de meios de trabalho especiais.

A experiência tem demonstrado que só se consegue atingir o objetivo pretendido com essas medições, se os seus resultados puderem ser convenientemente avaliados e comparados. Para tal, dever-se-ão utilizar protocolos de medição que permitam uma sistematização da informação considerada relevante, complementados, se necessário, por desenhos das peças. A recolha de resultados deverá efetuar-se tanto em peças fabricadas em série como em peças de fabricação individual, no domínio da construção mecânica, sem a necessidade de se recorrer a qualquer processo de amostragem particular e incidindo sobre os elementos geométricos sem indicações diretas de tolerância, nos desenhos dessas peças.

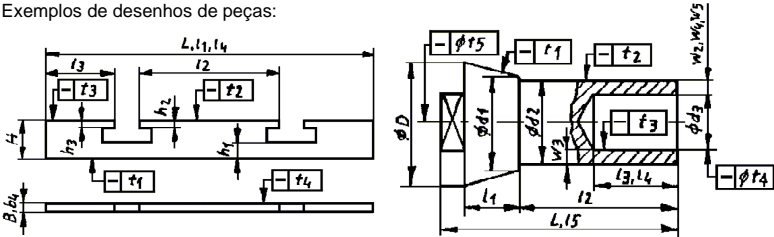
A conceção desses protocolos de medições poderá basear-se no modelo apresentado, no suplemento 1 da antiga norma DIN 7168-2, para a recolha de resultados de desvios geométricos de retitude correntes (ver figura 9.11).

Número do protocolo de medição



para desvios de retitude de linhas de contorno, eixos e superfícies, nas peças a trabalhar.

Exemplos de desenhos de peças:



Peça a trabalhar, em termos gerais					Elemento de forma medido								Observações
Desenho ou artigo	Tamanho da série	Medidas de atravancamento	Tolerâncias gerais	Material e estado	Fabricação Procedimento e tratamentos térmicos	Rugosidade	Revestimento metálico e espessura da camada superficial	Forma (ver código anexo)	Dimensões	Espessura material ou de parede	Tolerância da medida e event. tolerância de forma e de posição	Desvio de retitude	
nº	(peça)	$L \times B \times H$ ou $\varnothing D \times L$ e event. outras medidas [mm] [kg]				[µm]	[µm]		$l \times b$ ou $\varnothing d$	$\varnothing d/w$ , $\varnothing d$ , $h$ ou $b$	[mm]	$t$ [mm]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
Observações													

Figura 9.11 – Exemplo de protocolo de medições para avaliação de desvios de retitude. Adaptado do Supl. 1 da norma DIN 7168-2

Este protocolo de medições foi concebido sobretudo para valores de medição individuais, de modo que seja preenchida uma linha, para cada valor de medição. Nestes casos, estas medições poderão ser realizadas em peças distintas ou em elementos de forma diferentes da mesma peça. Deverá

também ser medido o maior número de peças diferentes, de modo a poder obter-se uma percepção alargada da exatidão corrente dos trabalhos oficinais.

Nos desenhos da figura 9.11, os indicadores de tolerâncias de retitude representados servem apenas para assinalar os elementos geométricos a avaliar, neste âmbito. Na coluna 2, dever-se-á indicar o tamanho da série ou do lote ou, no mínimo, assinalar o tipo de fabricação: em série (S) ou individual (I). Na coluna 9, o tipo do elemento de forma medido deverá ser identificado através de uma codificação apropriada, como por exemplo: geratriz de superfície cilíndrica exterior (AZ), geratriz de superfície cilíndrica interior (IZ), geratriz de superfície cónica exterior (AK), geratriz de superfície cónica interior (IK), superfície exterior (AF), superfície interior (IF) e eixo (A).

Na avaliação de desvios geométricos, neste âmbito, através de um instrumento de medição por contacto mecânico, recomenda-se normalmente a utilização de um apalpador de ponta esférica de raio  $R = 1,5$  mm, no mínimo (para ranhuras e furos pequenos, deverá ser acordada a utilização de um apalpador com uma ponta mais pequena), o que permitirá uma filtragem mecânica dos efeitos da rugosidade das superfícies a medir (ver [H1] e supl. 1 da DIN 7168-2).

Todos os valores de medições individuais recolhidos nos vários protocolos de medição deverão ser coligidos num gráfico de frequências, idêntico ao apresentado na figura 9.12, de modo a facilitar a avaliação global da informação dos diferentes protocolos.

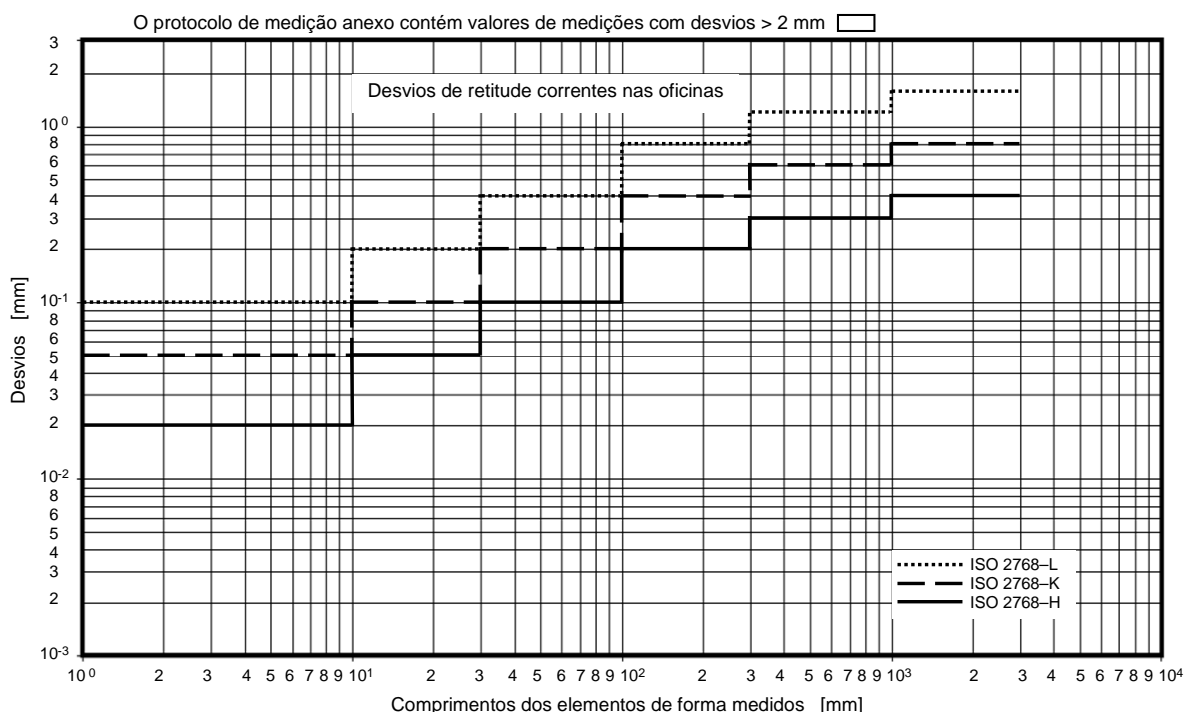


Figura 9.12 – Gráfico para a representação das frequências dos desvios de retitude medidos

Cada valor de medição deverá ser registado, neste gráfico, com base num conjunto de símbolos do tipo: (●) retificação, (x) fresagem, (○) aplainamento, (Δ) torneamento, etc. Os escalões das classes de tolerância, indicados no gráfico da figura 9.12, servem apenas para orientação dos utilizadores.

Este procedimento com vista à determinação da exatidão oficial corrente, ao nível das diferentes unidades industriais, pode ser alargado a outros processos de fabricação, para além dos processos de corte por arranque de apara.

### 9.3.4 Indicações nos desenhos

Para especificar tolerâncias gerais, em conformidade com as Partes 1 e 2 da norma ISO 2768, deve indicar-se a seguinte informação, no interior ou junto da legenda do desenho:

- a) Tolerâncias gerais ISO 2768;
- b) a classe de tolerância para as dimensões, em conformidade com a Parte 1;
- c) a classe de tolerância para a geometria, em conformidade com a Parte 2.

Exemplos: **Tolerâncias gerais ISO 2768-mH**

As classes de tolerância média (**m**) para as dimensões e **H** para a geometria, indicadas neste exemplo, correspondem à exatidão oficial corrente em engenharia mecânica, [H1]. Neste caso, as tolerâncias gerais para dimensões angulares, em conformidade com a ISO 2768-1, não se aplicam a ângulos retos (90°) implícitos, uma vez que a ISO 2768-2 especifica tolerâncias gerais de perpendicularidade.

No caso de se considerarem apenas as tolerâncias dimensionais gerais, em conformidade com a ISO 2768-1, a designação a inscrever no desenho cingir-se-á a:

#### **Tolerâncias gerais ISO 2768-m**

Por sua vez, a não especificação de tolerâncias dimensionais gerais, deve levar à omissão da respetiva letra na designação a indicar no desenho:

#### **Tolerâncias gerais ISO 2768-H**

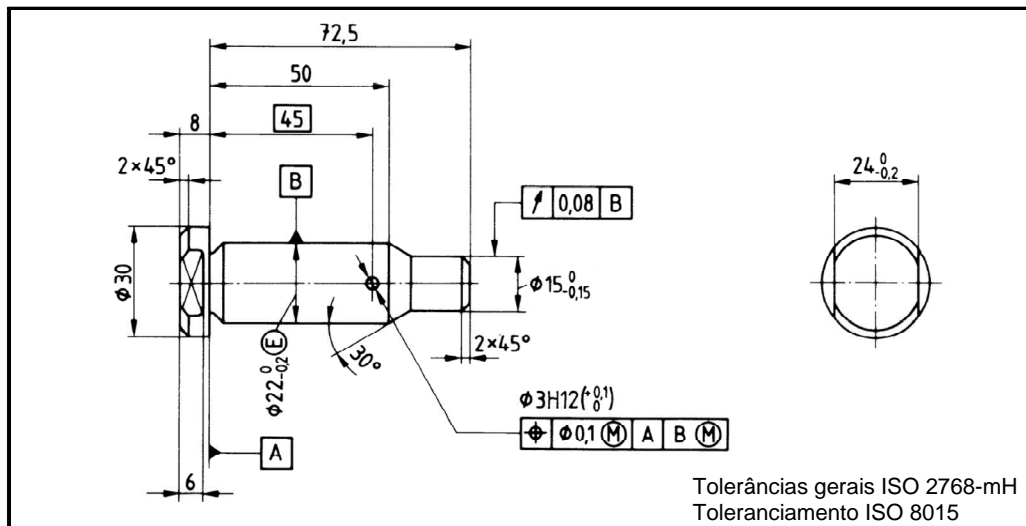
No caso de se pretender aplicar o **requisito de envolvente** **(E)** a todos os elementos de tamanho dos tipos “superfícies cilíndricas” e “duas superfícies planas paralelas opostas”, deve especificar-se, no desenho, a seguinte designação geral:

#### **Tolerâncias gerais ISO 2768-mH-E**

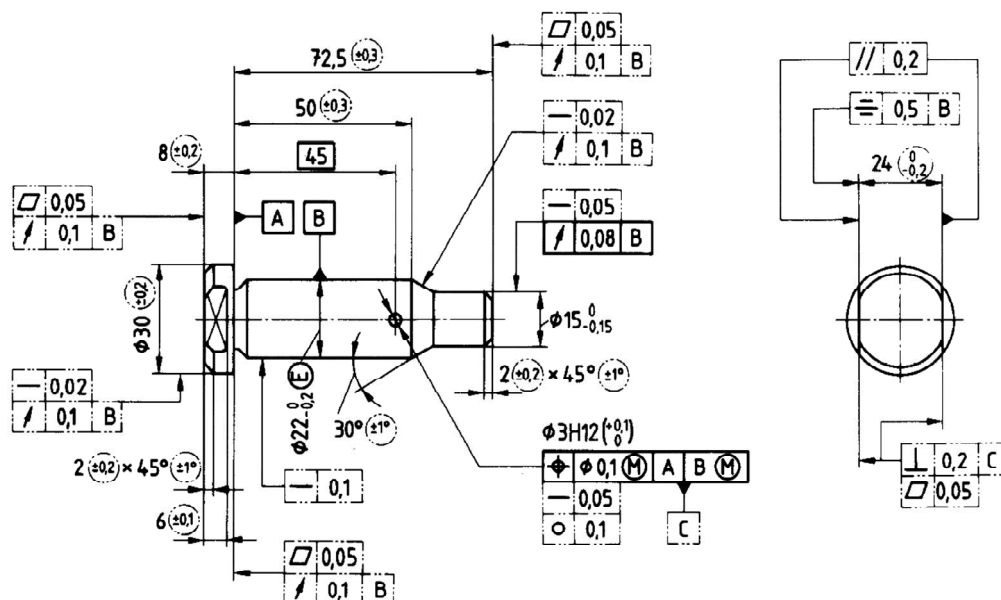
Atualmente, esta modificação do operador de especificação, por omissão, pode também ser efetuada através da indicação “Tamanho ISO 14405 **(E)**”, inscrita no interior ou junto da legenda do desenho. No entanto, o requisito de envolvente **(E)** não pode ser aplicado a elementos com tolerâncias geométricas de retitude individuais maiores do que as tolerâncias dimensionais dos seus tamanhos, tal como se verifica, por exemplo, em materiais em bruto e em semiprodutos.

### 9.3.5 Exemplo de aplicação a um desenho

Na figura 9.13, exemplifica-se como deve ser interpretado um desenho de definição de uma peça, em termos de tolerâncias dimensionais (lineares e angulares) e geométricas gerais, com base nas indicações pertinentes nele inscritas.



a) Desenho de definição



**Notas:**

- 1) As tolerâncias representadas envolvidas por linhas a traço longo-dois pontos fino são tolerâncias gerais. Estes valores de tolerâncias deverão ser obtidos, automaticamente, através de operações de corte por arranque de apara, numa oficina cuja exatidão corrente seja igual ou superior à da ISO 2768-mH e, normalmente, não deverão requerer o seu controlo.
- 2) Como certas tolerâncias limitam também os desvios de outras características do mesmo elemento, por exemplo, a tolerância de perpendicularidade limita também os desvios de retitude, nem todas as tolerâncias gerais são mostradas nesta interpretação do desenho.

b) Interpretação do desenho

Figura 9.13 – Interpretação de um desenho de definição em termos de tolerâncias dimensionais (lineares e angulares) e geométricas gerais (ISO 2768-2)



## 9.4 Tolerâncias dimensionais e geométricas gerais e sobre-espessuras para trabalho mecânico para peças fundidas (ISO 8062-3)

### 9.4.1 Introdução

A Parte 3 da norma ISO 8062 especifica tolerâncias dimensionais e geométricas gerais bem como graus de sobre-espessura para trabalho mecânico ("*machining allowance grades*") para peças fundidas ("*castings*"), em todos os metais e suas ligas, produzidas através de vários processos de fabricação de peças fundidas (ver exemplos na figura 9.14), conforme estas são entregues ao cliente.

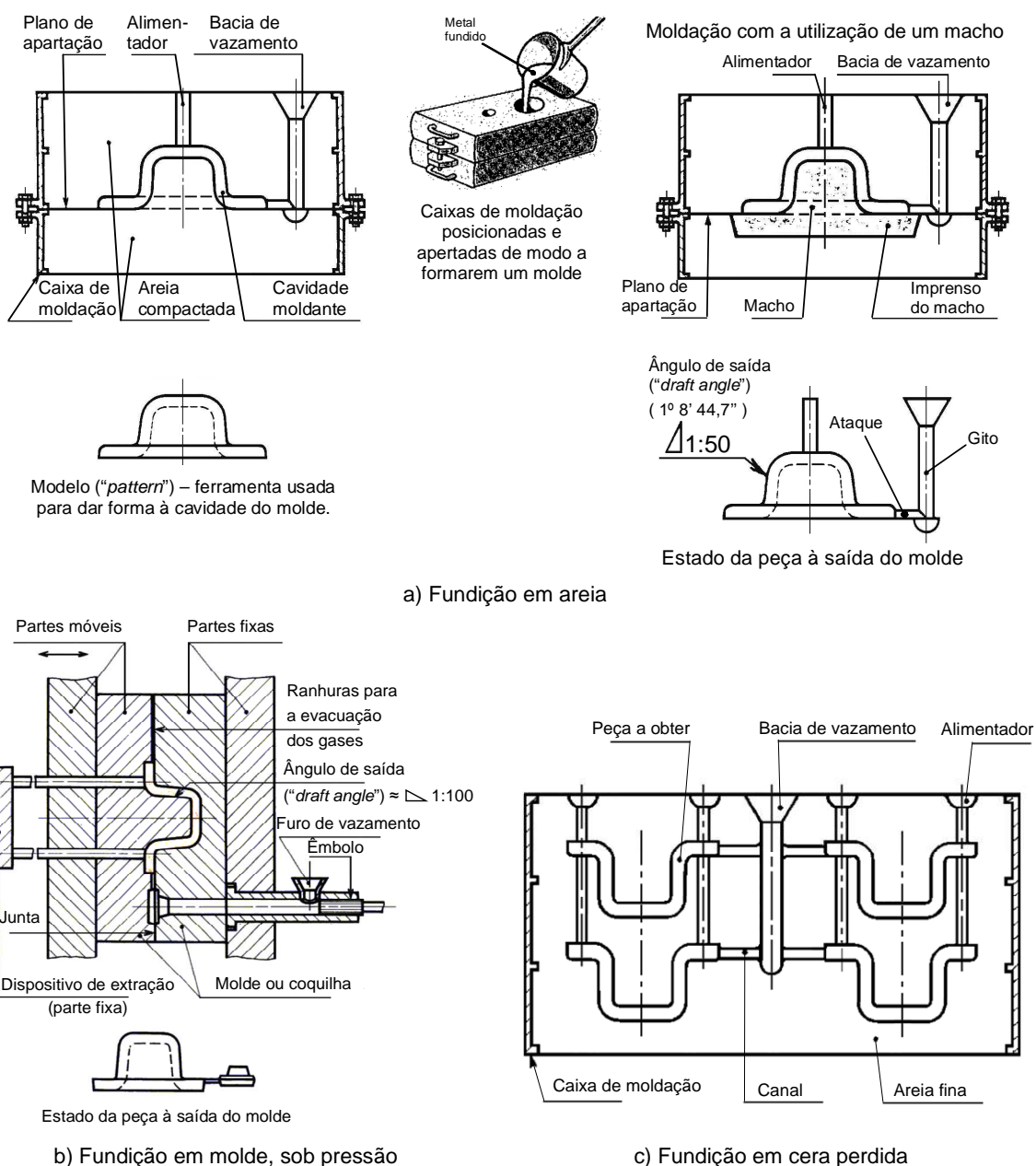


Figura 9.14 – Exemplos de processos de fabricação de peças fundidas. Adaptada de [C1]

O sistema de tolerâncias especificado na ISO 8062-3 aplica-se quando a unidade de fundição fornece equipamento específico [um modelo ("*pattern*") ou um molde permanente ("*die*"), ver exemplos na figura 9.14] ou aceita a responsabilidade pela sua verificação.

As tolerâncias especificadas para uma peça fundida podem determinar o método de fundição, sendo recomendável que, antes da finalização da concepção ou da encomenda, o cliente coopere com a fundição para discutir:

- a) a concepção proposta para a peça fundida e a exatidão requerida;
- b) os requisitos para trabalho mecânico;
- c) o método de fundição;
- d) a posição das superfícies de apartação (ou de junta) e os ângulos de saída necessários;
- e) o número de peças fundidas a fabricar;
- f) o equipamento de fundição envolvido;
- g) as consequências do desgaste do equipamento, durante o seu ciclo de vida;
- h) o sistema de referências parciais a adotar, em conformidade com a ISO 5459;
- i) a liga a fundir;
- j) quaisquer requisitos especiais, tais como, por exemplo, tolerâncias dimensionais e geométricas individuais, raios de concordância interiores, e sobre-espessuras individuais para trabalho mecânico.
- k) tolerâncias dimensionais para grandes séries e produção em massa, em que o desenvolvimento, a regulação e a manutenção do equipamento de fundição permitem obter tolerâncias apertadas;
- l) tolerâncias dimensionais para pequenas séries e produção unitária;
- m) tolerâncias geométricas.

Esta norma pode também ser utilizada na escolha de valores para tolerâncias individuais, mas não se aplica a modelos em CAD-3D não cotados.

### 9.4.2 Cotagem nominal

As dimensões nominais de peças fundidas são dimensões, num desenho, com as quais se relacionam as tolerâncias para peças fundidas [ver figura 9.15 a)]. Podem ser dimensões de peças em bruto de fundição ("*final moulded parts*"), antes de serem submetidas a processos de corte por arranque de apara, que incluem a necessária sobre-espessura para trabalho mecânico [ver figura 9.15 b)], ou dimensões de peças fundidas após acabamento mecânico ("*final machined moulded parts*").

A sobre-espessura requerida para trabalho mecânico, **RMA** ("*required machining allowance*"), em peças em bruto de fundição, é o valor mínimo admissível da sobre-espessura de matéria que permite assegurar a remoção das imperfeições do material e da superfície, através de uma operação subsequente de corte por arranque de apara, de modo a obter-se o estado de superfície desejado e as características dimensionais e geométricas especificadas.

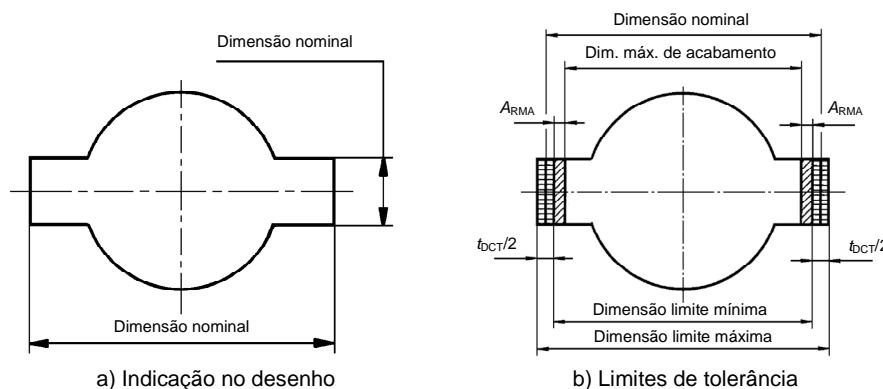


Figura 9.15 – Exemplos de dimensões nominais e tolerâncias de peças em bruto de fundição (ISO 8062:1994)

Com exceção da cotação da espessura de paredes (onde poderá haver séries de duas dimensões), devem evitar-se as disposições de dimensões em série.

### 9.4.3 Graus de tolerância

A exatidão de um processo de fundição está dependente de muitos fatores, entre os quais:

- a) a complexidade da concepção;
- b) o tipo de equipamento (modelos ou moldes);
- c) o metal ou a liga em causa;
- d) o estado do equipamento (modelos ou moldes);
- e) os métodos de trabalho da fundição.

As tolerâncias dimensionais e geométricas individuais devem ser indicadas em conformidade com as normas GPS aplicáveis. Quando se utilizam tolerâncias gerais, é necessário verificar se são necessárias tolerâncias mais pequenas, por razões funcionais, ou tolerâncias mais largas, por razões económicas. Em ambos os casos, devem ser indicadas tolerâncias individuais.

#### 9.4.3.1 Graus de tolerância dimensional para peças fundidas (DCTG)

Estão definidos 16 graus de tolerância dimensional para peças fundidas (*"dimensional casting tolerance grades"*), designados de DCTG 1 a DCTG 16, ver quadro 9.6. Por omissão, as tolerâncias dimensionais das peças fundidas (DCT) têm desvios simétricos ( $\pm t_{DCT}/2$ ), ver figura 9.15 b). Por questões técnicas, uma tolerância poderá ser assimétrica, devendo, nesse caso, ser especificada diretamente no desenho, após a respetiva dimensão nominal.

Os valores das tolerâncias dimensionais, do quadro 9.6, são baseados em dados resultantes da experiência em fundição, provenientes de vários países. Estas informações foram utilizadas para construir uma série de curvas suaves, utilizando razões de  $\sqrt{2}$ , para os graus DCTG 1 a DCTG 13, e  $\sqrt[3]{2}$ , para os graus DCTG 13 a DCTG 16, em que cada uma dessas curvas corresponde a uma linha de valores numéricos do quadro 9.6.

Quadro 9.6 – Tolerâncias dimensionais lineares de peças fundidas (DCT) (ISO 8062-3)

Dimensões nominais de peças em bruto (mm)		Tolerâncias dimensionais lineares para graus de tolerância dimensional de peças fundidas (DCTG) <sup>1)</sup>															
		$t_{DCT}$ [mm]															
		DCTG 1	DCTG 2	DCTG 3	DCTG 4	DCTG 5	DCTG 6	DCTG 7	DCTG 8	DCTG 9	DCTG 10	DCTG 11	DCTG 12	DCTG 13	DCTG 14	DCTG 15	DCTG 16 <sup>2)</sup>
—	≤ 10	0,09	0,13	0,18	0,26	0,36	0,52	0,74	1	1,5	2	2,8	4,2	—	—	—	—
> 10	≤ 16	0,1	0,14	0,2	0,28	0,38	0,54	0,78	1,1	1,6	2,2	3	4,4	—	—	—	—
> 16	≤ 25	0,11	0,15	0,22	0,3	0,42	0,58	0,82	1,2	1,7	2,4	3,2	4,6	6	8	10	12
> 25	≤ 40	0,12	0,17	0,24	0,32	0,46	0,64	0,9	1,3	1,8	2,6	3,6	5	7	9	11	14
> 40	≤ 63	0,13	0,18	0,26	0,36	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	10	12	16
> 63	≤ 100	0,14	0,2	0,28	0,4	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6	9	11	14	18
> 100	≤ 160	0,15	0,22	0,3	0,44	0,62	0,88	1,2	1,8	2,5	3,6	5	7	10	12	16	20
> 160	≤ 250	—	0,24	0,34	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	14	18	22
> 250	≤ 400	—	—	0,4	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6,2	9	12	16	20	25
> 400	≤ 630	—	—	—	0,64	0,9	1,2	1,8	2,6	3,6	5	7	10	14	18	22	28
> 630	≤ 1000	—	—	—	—	1	1,4	2	2,8	4	6	8	11	16	20	25	32
> 1000	≤ 1600	—	—	—	—	—	1,6	2,2	3,2	4,6	7	9	13	18	23	29	37
> 1600	≤ 2500	—	—	—	—	—	—	2,6	3,8	5,4	8	10	15	21	26	33	42
> 2500	≤ 4000	—	—	—	—	—	—	—	4,4	6,2	9	12	17	24	30	38	49
> 4000	≤ 6300	—	—	—	—	—	—	—	—	7	10	14	20	28	35	44	56
> 6300	≤ 10000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	16	23	32	40	50	64

<sup>1)</sup> Para espessuras de parede, nos graus DCTG 1 a DCTG 15, adota-se um grau imediatamente superior.

<sup>2)</sup> O grau DCTG 16 existe apenas para espessuras de parede de peças fundidas geralmente especificadas com DCTG 15.

Muitas dimensões de uma peça fundida são afetadas pela presença de uma junta do molde (“*mould joint*”) ou de um macho (“*core*”), ver exemplos nas figuras 9.14 e 9.24, requerendo tolerâncias dimensionais alargadas. Uma vez que o projetista não estará, necessariamente, ciente da disposição do molde e do macho a utilizar, os valores do quadro 9.6 já incluem incrementos para ter em conta as possíveis ocorrências deste tipo.

Com base em dados resultantes da experiência em fundição, os graus de tolerância que, normalmente, se podem atingir com diferentes métodos, metais e ligas de fundição estão indicados nos quadros 9.7 e 9.8.

Quadro 9.7 – Graus de tolerância dimensional para peças em bruto de fundição (DCTG), produzidas em grandes séries (ISO 8062-3)

Métodos	Graus de tolerância dimensional (DCTG) para metais e ligas de fundição								
	Aço	Ferro fundido cinzento	Ferro fundido nodular	Ferro fundido maleável	Ligas de cobre	Ligas de zinco	Ligas de metais ligeiros	Ligas à base de níquel	Ligas à base de cobalto
Fundição em areia, moldação manual	11 a 14	11 a 14	11 a 14	11 a 14	10 a 13	10 a 13	9 a 12	11 a 14	11 a 14
Fundição em areia, moldação à máquina, e moldação em carapaça	8 a 12	8 a 12	8 a 12	8 a 12	8 a 10	8 a 10	7 a 9	8 a 12	8 a 12
Molde metálico permanente (gravidade e baixa pressão)	—	7 a 9	7 a 9	7 a 9	7 a 9	7 a 9	6 a 8	—	—
Fundição em molde, sob pressão	—	—	—	—	6 a 8	3 a 6	6 <sup>1)</sup>	—	—
Fundição em cera perdida <sup>2)</sup>	4 a 6	4 a 6	4 a 6	—	4 a 6	—	4 a 6	4 a 6	4 a 6
NOTA 1: Os graus de tolerância indicados são os que, normalmente, podem ser obtidos para peças fundidas produzidas em grandes séries, se os fatores de produção que influenciam a exatidão dimensional da peça fundida tiverem sido completamente otimizados.									
NOTA 2: Para peças fundidas complexas, recomenda-se um grau de tolerância mais largo.									
<sup>1)</sup> A dimensão máxima de atravancamento influencia fortemente a escolha do grau de tolerância. Os graus de tolerância seguintes são recomendados para as dimensões máximas de atravancamento: dimensões de atravancamento > 50 mm → DCTG 7; > 180 mm → DCTG 8; > 500 mm → DCTG 9.									
<sup>2)</sup> Para peças fundidas em cera perdida e para as dimensões máximas de atravancamento, recomenda-se: dimensões de atravancamento > 100 mm → DCTG 4 a 8; > 400 mm → DCTG 4 a 9.									

Para grandes séries de trabalho repetitivo, poderá ser possível efetuar afinações e controlar cuidadosamente as posições do macho, de modo a obterem-se graus de tolerância dimensional melhores do que os indicados no quadro 9.7.

Quadro 9.8 – Graus de tolerância dimensional para peças em bruto de fundição (DCTG), produzidas em pequenas séries ou peça-a-peça (ISO 8062-3)

Método	Material de moldação	Graus de tolerância dimensional (DCTG) para metais e ligas de fundição							
		Aço	Ferro fundido cinzento	Ferro fundido nodular	Ferro fundido maleável	Ligas de cobre	Ligas de metais ligeiros	Ligas à base de níquel	Ligas à base de cobalto
Fundição em areia, moldação manual	Areia verde autosecativa	13 a 15	13 a 15	13 a 15	13 a 15	13 a 15	11 a 13	13 a 15	13 a 15
		12 a 14	11 a 14	11 a 14	11 a 14	10 a 13	10 a 13	12 a 14	12 a 14

NOTA: Os valores deste quadro aplicam-se, geralmente, a dimensões nominais maiores do que 25 mm. No entanto, de um ponto de vista prático e económico, para dimensões menores, podem normalmente ser asseguradas tolerâncias mais finas:

a) dimensões nominais até 10 mm: 3 graus mais finos;  
b) dimensões nominais > 10 mm até 16 mm: 2 graus mais finos;  
c) dimensões nominais > 16 mm até 25 mm: 1 grau mais fino.

Geralmente, em fundição em areia, para pequenas séries produtivas e para peças fundidas únicas, é impraticável e antieconómico utilizar modelos metálicos e desenvolver equipamento e procedimentos de fundição que permitam a obtenção de tolerâncias apertadas, da ordem das indicadas no quadro 9.7, o que justifica as tolerâncias mais largas previstas, no quadro 9.8, para este modo de fabricação.

#### 9.4.3.2 Graus de tolerância geométrica (GCTG)

As tolerâncias geométricas de peças fundidas (GCT), indicadas no quadro 9.9, são também baseadas em dados resultantes da experiência em fundição, provenientes de vários países. Existem 7 graus de tolerância geométrica para peças fundidas (*"geometrical casting tolerance grades"*), designados de GCTG 2 a GCTG 8. O grau GCTG 1 fica reservado para valores mais finos que poderão vir a ser necessários no futuro.

Quadro 9.9 – Tolerâncias geométricas de peças fundidas (GCT) (ISO 8062-3)

Característica geométrica		Graus de tolerância geométrica de peças fundidas (GCTG)									
Retitude		GCTG 2	GCTG 3	GCTG 4	GCTG 5	GCTG 6	GCTG 7	GCTG 8			
Planeza		GCTG 2	GCTG 3	GCTG 4	GCTG 5	GCTG 6	GCTG 7	GCTG 8			
Circularidade, paralelismo, perpendicularidade e simetria		GCTG 2	GCTG 3	GCTG 4	GCTG 5	GCTG 6	GCTG 7	GCTG 8			
Coaxialidade				GCTG 2	GCTG 3	GCTG 4	GCTG 5	GCTG 6	GCTG 7	GCTG 8	
Dimensão nominal relativa ao elemento da peça moldada (mm)		Valores das tolerâncias geométricas ( $t_{GCT}$ ) [mm]									
—	≤ 10	0,08	0,12	0,18	0,27	0,4	0,6	0,9	1,4	2	3
> 10	≤ 30	0,12	0,18	0,27	0,4	0,6	0,9	1,4	2	3	4,5
> 30	≤ 100	0,18	0,27	0,4	0,6	0,9	1,4	2	3	4,5	7
> 100	≤ 300	0,27	0,4	0,6	0,9	1,4	2	3	4,5	7	10
> 300	≤ 1000	0,4	0,6	0,9	1,4	2	3	4,5	7	10	15
> 1000	≤ 3000	—	—	—	3 <sup>1)</sup>	4 <sup>2)</sup>	6 <sup>3)</sup>	9	14	20	30
> 3000	≤ 6000	—	—	—	6 <sup>1)</sup>	8 <sup>2)</sup>	12 <sup>3)</sup>	18	28	40	60
> 6000	≤ 10000	—	—	—	12 <sup>1)</sup>	16 <sup>2)</sup>	24 <sup>3)</sup>	36	56	80	120

<sup>1)</sup> Valores a considerar apenas na retitude  
<sup>2)</sup> Valores a considerar apenas na retitude e na planeza  
<sup>3)</sup> Valores a considerar apenas na retitude, na planeza e na circularidade, paralelismo, perpendicularidade e simetria

Os valores das tolerâncias geométricas gerais ( $t_{GCT}$ ), indicados no quadro 9.9, para um dado grau de tolerância geométrica, devem ser selecionados em função da maior dimensão nominal do elemento geométrico em consideração, na peça moldada, sem ter em conta as dimensões nominais de concordâncias interiores (“*fillets*”) e chanfros que não estejam indicadas individualmente.

As tolerâncias geométricas gerais de **cilindricidade** são aplicadas considerando as seguintes componentes: tolerâncias de retitude e de paralelismo, das linhas geratrizes opostas, e de circularidade, das secções retas, do elemento cilíndrico em questão. Cada uma delas é limitada pelos valores das suas tolerâncias gerais.

As tolerâncias geométricas gerais de forma (retitude, planeza, circularidade) e de orientação (paralelismo, perpendicularidade e inclinação) não se aplicam a elementos com ângulo de saída (“*draft angle*”); ver exemplo na figura 9.14 a). Estes elementos necessitam de tolerâncias indicadas individualmente, em conformidade com a função e com as recomendações do fabricante. Outras tolerâncias geométricas, para além das indicadas no quadro 9.9, tais como, por exemplo, inclinação, perfil, localização, planeza de zona comum, devem ser indicadas individualmente.

No quadro 9.10, estão indicados os graus que podem ser esperados com diferentes métodos de produção e ligas metálicas.

Quadro 9.10 – Graus de tolerância geométrica para peças fundidas (GCTG) (ISO 8062-3)

Método	Graus de tolerância geométrica (GCTG) para metais e ligas de fundição								
	Aço	Ferro fundido cinzento	Ferro fundido nodular	Ferro fundido maleável	Ligas de cobre	Ligas de zinco	Ligas de metais ligeiros	Ligas à base de níquel	Ligas à base de cobalto
Fundição em areia, moldação manual	6 a 8	5 a 7	5 a 7	5 a 7	5 a 7	5 a 7	5 a 7	6 a 8	6 a 8
Fundição em areia, moldação à máquina, e moldação em carapaça	5 a 7	4 a 6	4 a 6	4 a 6	4 a 6	4 a 6	4 a 6	5 a 7	5 a 7
Molde metálico permanente (gravidade e baixa pressão)	—	—	—	—	3 a 5	—	3 a 5	—	—
Fundição em molde, sob pressão <sup>1)</sup>	—	—	—	—	2 a 4	2 a 4	2 a 4	—	—
Fundição em cera perdida	4 a 6 <sup>2)</sup>	3 a 5	3 a 5	3 a 5	3 a 5	2 a 4	3 a 5	4 a 6 <sup>2)</sup>	4 a 6 <sup>2)</sup>
<sup>1)</sup> Aplicam-se os seguintes graus: GCTG 2 deverá ser usado apenas por acordo especial; GCTG 3, para peças fundidas correntes, sem gavetas (movimentos) para a superfície de contorno; GCTG 4, para peças fundidas complexas, bem como com gavetas (movimentos) para a superfície de contorno. <sup>2)</sup> Para peças fundidas em cera perdida: dimensões > 100 mm → grau 4 a 8; > 400 mm → grau 4 a 9.									

#### 9.4.3.2.1 Referências especificadas

Para a aplicação de tolerâncias gerais de orientação, em conformidade com a norma ISO 8062-3, deve ser especificado, no desenho, um **sistema de referências especificadas** (“*datum system*”) e identificado através da indicação “ISO 8062-3 DS” no interior ou junto da legenda do desenho, conforme se exemplifica nas figuras 9.16 e 9.27 a).

ISO 8062-3 DS 

A	B	C
---	---	---

Figura 9.16 – Exemplo de indicação de um sistema de referências especificadas para tolerâncias gerais de orientação, a inscrever no desenho de uma peça de fundição, em conformidade com a ISO 8062-3

Este sistema de referências especificadas não se aplica às tolerâncias geométricas gerais de coaxialidade e de simetria.

Para referências especificadas de **tolerâncias gerais de coaxialidade**, aplicam-se as seguintes condições:

- a) Se um elemento cilíndrico (interno ou externo) se estender sobre todo o comprimento de todos os outros elementos cilíndricos coaxiais, o eixo deste elemento é tomado como a **referência especificada simples** (ver figura 9.17).



Figura 9.17 – Tolerâncias gerais de coaxialidade, referência especificada simples (ISO 8062-3)

- b) Caso contrário, usa-se uma **referência especificada comum**, composta pelos eixos dos dois elementos mais afastados, sobre a linha de eixo do desenho considerado (ver figura 9.18). Se existir mais do que uma possibilidade (por exemplo, elementos internos ou externos), usa-se o elemento com o maior diâmetro (ver figura 9.19).

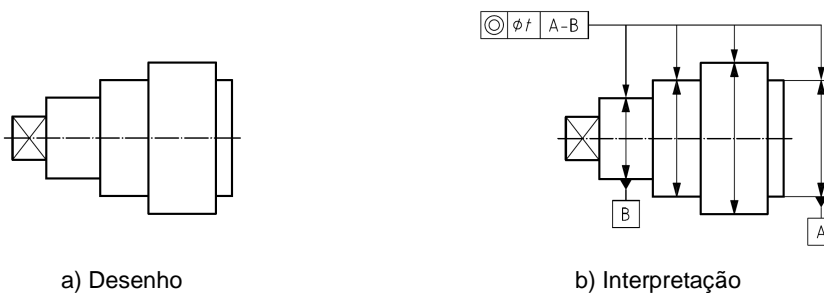


Figura 9.18 – Tolerâncias gerais de coaxialidade, referência especificada comum (ISO 8062-3)

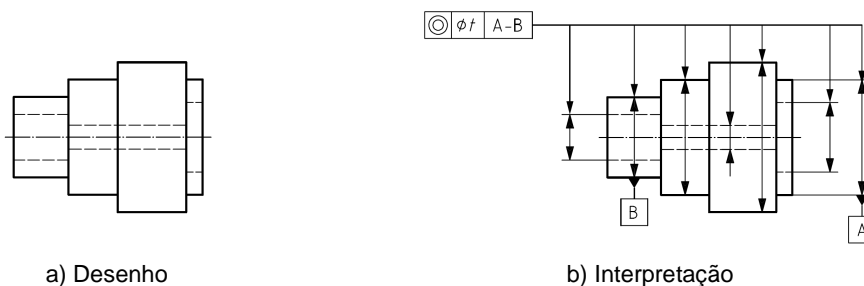


Figura 9.19 – Tolerâncias gerais de coaxialidade, referência especificada comum com o maior diâmetro (neste caso o diâmetro exterior), (ISO 8062-3)

As tolerâncias gerais de coaxialidade aplicam-se também aos próprios elementos de referência, se for considerada uma referência especificada comum.

Para referências especificadas de **tolerâncias gerais de simetria**, aplicam-se as seguintes condições:

- a) Se um elemento de tamanho (interno ou externo), composto por dois planos paralelos opostos, se estender ao longo de todo o comprimento de todos os restantes elementos co-simétricos, o plano mediano deste elemento é tomado como a **referência especificada simples** (ver figura 9.20).

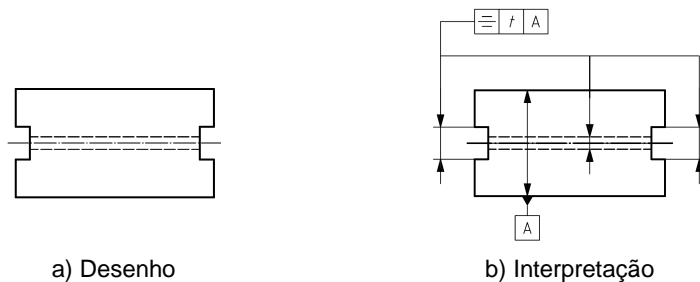


Figura 9.20 – Tolerâncias gerais de simetria, referência especificada simples (ISO 8062-3)

- b) Caso contrário, usa-se uma **referência especificada comum**, composta pelos planos medianos dos dois elementos mais afastados, sobre a linha (plano) de simetria do desenho considerado (ver figura 9.21). Se existir mais do que uma possibilidade, usa-se o elemento com o maior tamanho (ver figura 9.22). Um dos dois elementos de referência pode ser cilíndrico (ver figura 9.23).

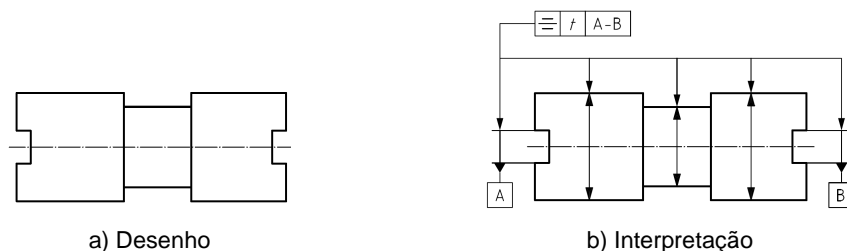


Figura 9.21 – Tolerâncias gerais de simetria, referência especificada comum (ISO 8062-3)

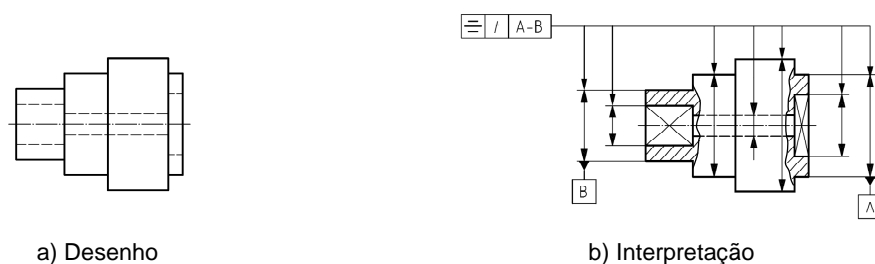


Figura 9.22 – Tolerâncias gerais de simetria, referência especificada comum com os maiores tamanhos (ISO 8062-3)

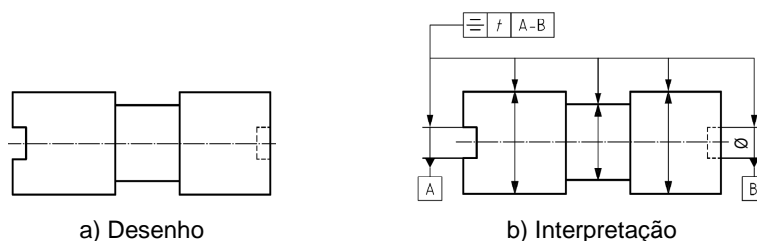


Figura 9.23 – Tolerâncias gerais de simetria, referência especificada comum com uma referência cilíndrica (ISO 8062-3)



As tolerâncias gerais de simetria aplicam-se também aos próprios elementos de referência, se for considerada uma referência especificada comum.

#### 9.4.4 Desencontro da superfície de apartação ou de junta (SMI)

O desencontro da superfície de apartação ou de junta (**SMI**) (*"surface mismatch"*) é um degrau na superfície de uma peça moldada ou uma variação de espessura causada por diferenças dimensionais, por um deslocamento ou por um desalinhamento entre as partes constituintes de um molde (ver figura 9.24).

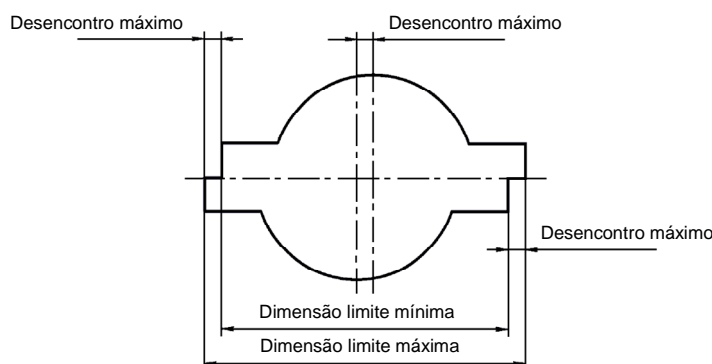


Figura 9.24 – Limitação do desencontro de superfícies através de dimensões lineares (ISO 8062:1994)

Por omissão, o desencontro da superfície de apartação é controlado indiretamente, através da verificação de dimensões lineares, em conformidade com o quadro 9.6 (ver figura 9.24). Pode variar entre zero e o valor da tolerância dimensional  $t_{DCT}$  indicado no quadro 9.6, de acordo com os tamanhos locais reais do elemento.

Em elementos geométricos sem ângulo de saída, o desencontro da superfície de apartação é também controlado e, por conseguinte, englobado nas tolerâncias de forma de retitude, planeza e circularidade, indicadas no quadro 9.9. Esta prática sobrepõe-se ao princípio de independência e resulta de, frequentemente, se ignorar a existência de uma linha de apartação e, portanto, se o elemento em causa é afetado.

Se for necessário restringir ainda mais o valor do desencontro da superfície de apartação, o valor máximo admissível deve ser especificado individualmente, em conformidade com a norma ISO 10135.

#### 9.4.5 Sobre-espessuras requeridas para trabalho mecânico (RMA)

Em termos gerais, os graus de sobre-espessura requerida para trabalho mecânico (**RMA**) (*"required machining allowance grades"*), indicados nos desenhos, aplicam-se a toda a peça em bruto de fundição, de modo a especificar-se um único valor de sobre-espessura para todas as superfícies

sujeitas a trabalho mecânico posterior, sendo esse valor selecionado a partir da **dimensão máxima de atravancamento** – o diâmetro  $S\emptyset$  da menor esfera que pode conter a peça fundida após acabamento mecânico, tendo em conta, apenas, as suas dimensões nominais (ver quadro 9.11).

Na norma ISO 8062-3, estão definidos 10 graus de sobre-espessura requerida para trabalho mecânico, designados de RMAG A a RMAG K (ver quadro 9.11).

Quadro 9.11 – Sobre-espessuras requeridas para trabalho mecânico (RMA), (ISO 8062-3)

Dimensão máxima de atravancamento (mm)		Valor de sobre-espessura para o grau de sobre-espessura para trabalho mecânico especificado (RMAG), $A_{RMA}$ [mm]									
		RMAG A	RMAG B	RMAG C	RMAG D	RMAG E	RMAG F	RMAG G	RMAG H	RMAG J	RMAG K
—	≤ 40	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	1	2
> 40	≤ 63	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,4	3
> 63	≤ 100	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4
> 100	≤ 160	0,3	0,4	0,5	0,8	1,1	1,5	2,2	3	4	6
> 160	≤ 250	0,3	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,5	8
> 250	≤ 400	0,4	0,7	0,9	1,3	1,8	2,5	3,5	5	7	10
> 400	≤ 630	0,5	0,8	1,1	1,5	2,2	3	4	6	9	12
> 630	≤ 1000	0,6	0,9	1,2	1,8	2,5	3,5	5	7	10	14
> 1000	≤ 1600	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,5	8	11	16
> 1600	≤ 2500	0,8	1,1	1,6	2,2	3,2	4,5	6	9	13	18
> 2500	≤ 4000	0,9	1,3	1,8	2,5	3,5	5	7	10	14	20
> 4000	≤ 6300	1	1,4	2	2,8	4	5,5	8	11	16	22
> 6300	≤ 10000	1,1	1,5	2,2	3	4,5	6	9	12	17	24

Nota: Os graus A e B aplicam-se apenas em casos especiais, por exemplo em produção em série, na qual o modelo, o processo de fundição e o processo de trabalho mecânico foram sujeitos a acordo entre o cliente e a fundição, no que respeita às superfícies de aperto e às superfícies de referência ou de referência parcial.

Os valores  $A_{RMA}$  de sobre-espessura, indicados no quadro 9.11, são valores nominais e não têm qualquer tolerância. Os graus recomendados, para os diferentes métodos de produção, metais e ligas metálicas, estão indicados no quadro 9.12, a título meramente informativo.

Quadro 9.12 – Graus típicos de sobre-espessura requerida para trabalho mecânico para peças em bruto de fundição (ISO 8062-3)

Métodos	Graus de sobre-espessura requerida para trabalho mecânico (RMAG) de metais e ligas de fundição								
	Aço	Ferro fundido cinzento	Ferro fundido nodular	Ferro fundido maleável	Ligas de cobre	Ligas de zinco	Ligas de metais ligeiros	Ligas à base de níquel	Ligas à base de cobalto
Fundição em areia, moldação manual	G a K	F a H <sup>1)</sup>	F a H <sup>1)</sup>	F a H	F a H	F a H	F a H <sup>1)</sup>	G a K	G a K
Fundição em areia, moldação à máquina, e moldação em carapaça	F a H	E a G	E a G	E a G	E a G	E a G	E a G	F a H	F a H
Molde metálico permanente (gravidade e a baixa pressão)	—	D a F	D a F	D a F	D a F	D a F	D a F	—	—
Fundição em molde, sob pressão	—	—	—	—	B a D	A a D	B a D	—	—
Fundição em cera perdida	E	E	E	—	E	—	E	E	E

<sup>1)</sup> Para peças fundidas com uma dimensão máxima de atravancamento superior a 6300 mm, aplicam-se os graus F a K.

Se for requerida a especificação de uma sobre-espessura particular para trabalho mecânico, numa superfície singular, a indicação individual do seu valor  $A_{RMA}$ , em milímetros, deve efetuar-se em conformidade com a norma ISO 1302 (ver exemplo na figura 9.25). Em peças fundidas em areia, as superfícies superiores poderão necessitar de uma sobre-espessura para trabalho mecânico (RMA) maior do que a especificada para as restantes superfícies. Os graus de RMA mais grosseiros,

selecionados para essas superfícies, devem também ser indicados individualmente, em conformidade com a norma ISO 1302.

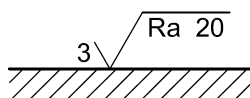


Figura 9.25 – Exemplo de indicação individual de uma sobre-espessura requerida para trabalho mecânico

Normalmente, o cliente fornece, à fundição, um desenho da peça fundida após acabamento mecânico, onde estão indicadas as superfícies que devem ser submetidas a trabalho mecânico. Nas superfícies que permanecem em bruto de fundição, sem indicações de tolerâncias individuais ou de tolerâncias gerais particulares, aplicam-se as tolerâncias gerais para peças fundidas, em conformidade com as indicações da norma ISO 8062-3, inscritas no desenho.

De acordo com a especificação técnica ISO/TS 8062-2, para as superfícies que devem ser trabalhadas pelo cliente (o desenho define apenas as características da peça fundida após trabalho mecânico), aplicam-se as seguintes regras:

- a) Os desvios dimensionais e geométricos da peça em bruto de fundição devem permitir a obtenção da peça fundida após acabamento mecânico (a existência da sobre-espessura requerida para trabalho mecânico é o requisito mínimo essencial para as superfícies de fundição poderem ser trabalhadas com a remoção de certas camadas da superfície).
- b) As dimensões nominais  $d_c$  da peça fundida, que se relacionam com superfícies que vão ser sujeitas a trabalho mecânico, devem ser calculadas a partir das dimensões nominais  $d_M$  da peça fundida após trabalho mecânico, tendo em conta as diversas influências.

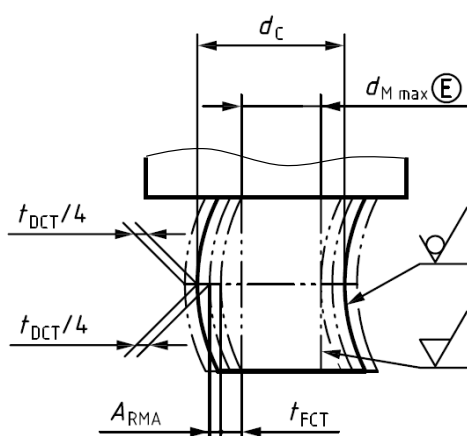
Atualmente, não há ainda um modo bem definido de aplicar a regra b), no contexto do futuro sistema de normas GPS. Numa primeira etapa, admite-se, para este cálculo, que as contribuições do tamanho, da forma e da sobre-espessura requerida para trabalho mecânico (excluindo o ângulo de saída) devem ser adicionadas linearmente, o que corresponde a uma acumulação dos extremos.

Com este processo de cálculo – o **método de acumulação** (ISO/TS 8062-2) – assume-se que as tolerâncias pertinentes (tolerâncias dimensionais, tolerâncias de forma da peça em bruto de fundição e tolerâncias de forma da peça de fundição após trabalho mecânico) se acumulam de acordo com um conceito do tipo “o pior possível” (“worst case”). Logo, este procedimento levará frequentemente à remoção (desnecessária) de uma grande quantidade de matéria, mas simplifica a especificação da peça em bruto de fundição.

O método de acumulação combina dois sistemas de toleranciamento diferentes: o toleranciamento dimensional linear e o toleranciamento geométrico por zonas de tolerância em conformidade com a norma ISO 1101. Este método não é aplicável a elementos que estejam completamente definidos apenas através de toleranciamento geométrico.

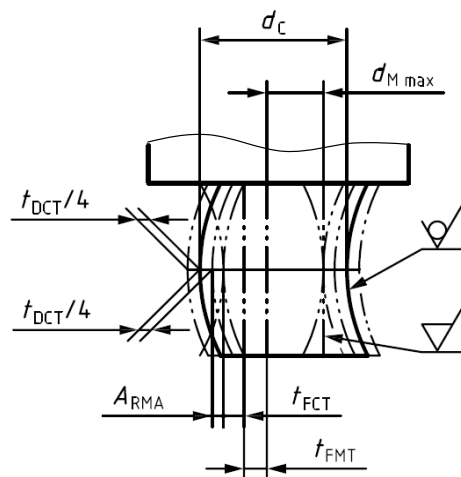
Nas figuras 9.26, apresentam-se as dependências geométricas entre a peça de fundição após acabamento mecânico e a peça em bruto de fundição, bem como as expressões de cálculo das dimensões nominais  $d_c$  da peça fundida com tolerâncias de desvios simétricos, em função das várias características geométricas relevantes. Os casos relativos a elementos de tamanho foram abordados com e sem a especificação do requisito de envolvente  $\textcircled{E}$  [ver figuras 9.26 a) a d)].

Para a determinação, de acordo com a ISO 8062-3, dos valores corretos das tolerâncias dimensionais  $t_{DCT}$  e geométricas de forma  $t_{FCT}$ , a utilizar nas expressões anexas, é necessário conhecer o valor final de  $d_c$ , pelo que este cálculo poderá ter de ser executado em mais do que um passo. Em elementos interiores (“furos”), no caso improvável deste procedimento entrar em ciclo, deve ser utilizado o maior valor de  $t_{DCT}$  ou  $t_{FCT}$  que dê origem ao menor valor de  $d_c$ .



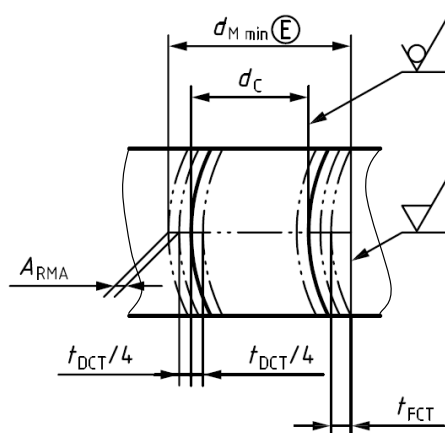
$$d_c = d_{M \max} + 2 A_{RMA} + t_{FCT} + t_{DCT}/2$$

a) Elemento exterior da peça após trabalho mecânico, com o requisito de envolvente  $\textcircled{E}$



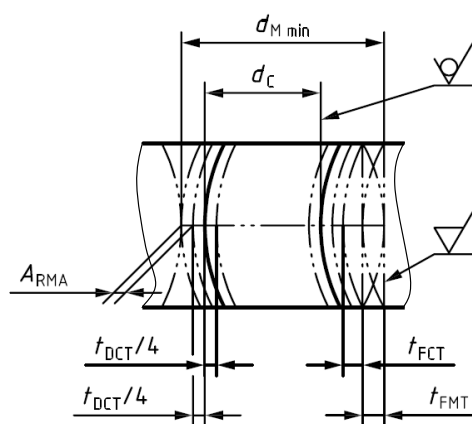
$$d_c = d_{M \max} + 2 A_{RMA} + t_{FCT} + t_{DCT}/2 + t_{FMT}$$

b) Elemento exterior da peça após trabalho mecânico, com o princípio de independência



$$d_c = d_{M \min} - 2 A_{RMA} - t_{FCT} - t_{DCT}/2$$

c) Elemento interior da peça após trabalho mecânico, com o requisito de envolvente  $\textcircled{E}$



$$d_c = d_{M \min} - 2 A_{RMA} - t_{FCT} - t_{DCT}/2 - t_{FMT}$$

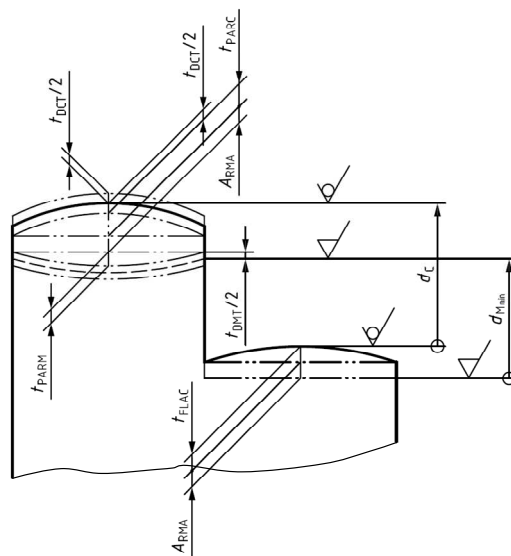
d) Elemento interior da peça após trabalho mecânico, com o princípio de independência

(continua)

Figura 9.26 – Exemplos de determinação de uma dimensão nominal  $d_c$  de uma peça em bruto de fundição, a partir de uma dimensão nominal  $d_M$  de uma peça de fundição após trabalho mecânico (ISO/TS 8062-2)

**Legenda:**

- $d_c$  – dimensão nominal da peça em bruto de fundição  
 $d_{Mmax}$  – dimensão máxima da peça fundida após trabalho mecânico  
 $d_{Mmin}$  – dimensão mínima da peça fundida após trabalho mecânico  
 $A_{RMA}$  – sobre-espessura requerida para trabalho mecânico  
 $t_{DCT}$  – tolerância dimensional de fundição  
 $t_{DMT}$  – tolerância dimensional de trabalho mecânico  
 $t_{FCT}$  – tolerância de forma de fundição  
 $t_{FLAC}$  – tolerância de planeza de fundição  
 $t_{FMT}$  – tolerância de forma de trabalho mecânico  
 $t_{PARC}$  – tolerância de paralelismo de fundição  
 $t_{PARM}$  – tolerância de paralelismo de trabalho mecânico



$$d_c = d_{Mmin} - t_{FLAC} + t_{DMT}/2 + t_{PARC} + t_{DCT}/2$$

e) Dimensão de um ressalto

Figura 9.26 – Exemplos de determinação de uma dimensão nominal  $d_c$  de uma peça em bruto de fundição, a partir de uma dimensão nominal  $d_M$  de uma peça de fundição após trabalho mecânico (ISO/TS 8062-2) (conclusão)

Em elementos cilíndricos, as tolerâncias de forma (cilindricidade),  $t_{FCT}$  e  $t_{FMT}$ , derivam da soma das tolerâncias de paralelismo e de circularidade. Em elementos constituídos por duas superfícies planas opostas, considera-se a maior das tolerâncias de planeza de cada das duas superfícies, quer para  $t_{FCT}$ , quer para  $t_{FMT}$ .

Na determinação da dimensão nominal  $d_c$  de um ressalto [ver figura 9.26 e)], a sobre-espessura requerida para trabalho mecânico,  $A_{RMA}$ , não deve ser tida em conta, uma vez que vai ser removida em ambas as superfícies consideradas. Adicionalmente, a tolerância de paralelismo de trabalho mecânico,  $t_{PARM}$ , também não deve ser considerada, já que a dimensão mínima da peça fundida após trabalho mecânico,  $d_{Mmin}$ , se aplica ao ponto mais exterior do material.

#### 9.4.6 Indicações nos desenhos

Para especificar tolerâncias gerais para peças fundidas, em conformidade com a Parte 3 da norma ISO 8062, deve indicar-se a totalidade ou parte da seguinte informação, no interior ou junto da legenda do desenho:

- Tolerâncias gerais ISO 8062-3;
- o grau de tolerância dimensional (DCTG), em conformidade com o quadro 9.6;
- o desencontro da superfície de apartação ou de junta (SMI) e o seu valor limite requerido, em conformidade com a norma ISO 10135;
- a sobre-espessura requerida para trabalho mecânico (RMA), em conformidade com o quadro 9.11 e o grau (RMAG) correspondente, entre parêntesis;
- o grau de tolerância geométrica (GCTG), em conformidade com o quadro 9.9.

Exemplo: **Tolerâncias gerais ISO 8062-3 – DCTG 12 – SMI  $\pm 1,5$  – RMA 6 (RMAG H) – GCTG 7**

Neste exemplo, especificou-se um grau 12 para as tolerâncias dimensionais de todas as dimensões lineares sem indicações de tolerâncias individuais; um desencontro máximo admissível da superfície de junta de 1,5 mm, entre cada uma das partes de todos os elementos da peça cortados por essa superfície e em todas as direções; uma sobre-espessura mínima para trabalho mecânico de 6 mm, no grau H, para uma peça cuja dimensão máxima de atravancamento se situa no intervalo de 400 mm a 630 mm; e um grau 7 para as tolerâncias geométricas de todas as geometrias sem indicações de tolerâncias individuais.

No caso de se considerarem relevantes apenas algumas tolerâncias das características atrás assinaladas, esta indicação poderá ser simplificada, assumindo uma das seguintes configurações simplificadas:

**Tolerâncias gerais ISO 8062-3 – DCTG 12**

**Tolerâncias gerais ISO 8062-3 – DCTG 12 – SMI  $\pm 1,5$**

**Tolerâncias gerais ISO 8062-3 – DCTG 12 – RMA 6 (RMAG H)**

**Tolerâncias gerais ISO 8062-3 – DCTG 12 – GCTG 7**

**Tolerâncias gerais ISO 8062-3 – DCTG 12 – RMA 6 (RMAG H) – GCTG 7**

**Tolerâncias gerais ISO 8062-3 – GCTG 7**

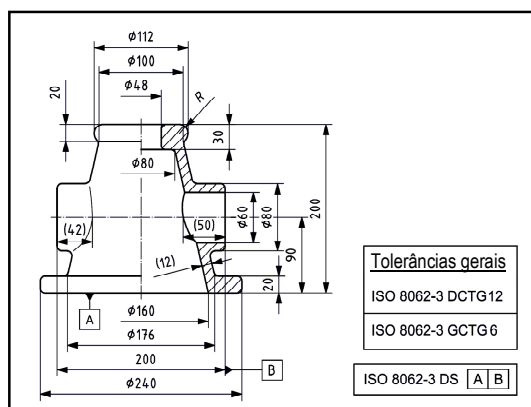
#### **9.4.7 Exemplo de aplicação a um desenho**

Com, base no desenho de definição de uma peça em bruto de fundição, apresentado na figura 9.27 a), exemplifica-se como deve ser feita a sua interpretação em termos de tolerâncias geométricas gerais, tendo em consideração as indicações pertinentes nele inscritas.

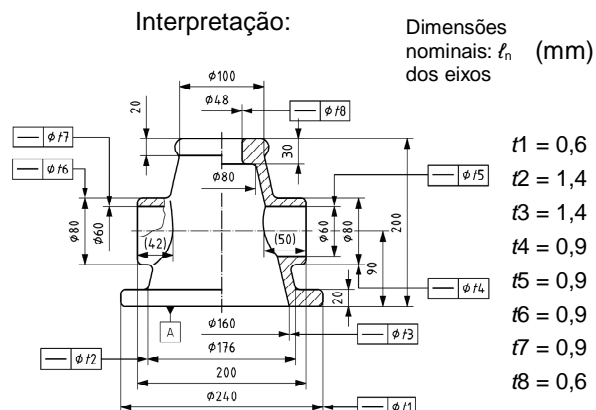
A referência à norma ISO 8062-3, feita no desenho, significa que as tolerâncias geométricas gerais para peças fundidas se aplicam a todos os elementos, da peça em bruto de fundição, sem indicação direta de tolerâncias geométricas que limitem os respetivos desvios.

As tolerâncias gerais de forma (retitude, planeza e circularidade) aplicam-se sem menção a qualquer referência especificada. Por sua vez, as tolerâncias gerais de orientação (paralelismo e perpendicularidade) aplicam-se com menção a um sistema de referências especificadas “DS”, conforme descrito na secção 9.4.3.2.1 deste texto. Finalmente, as tolerâncias gerais de posição (simetria e coaxialidade) aplicam-se com menção a referências especificadas consideradas segundo as condições indicadas também na secção 9.4.3.2.1.

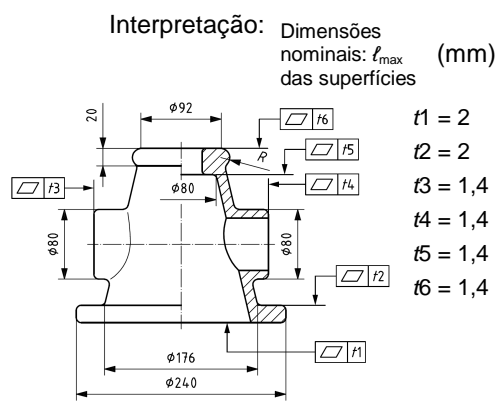
Atualmente, este tipo de toleranciamento (tolerâncias dimensionais e geométricas aplicadas de modo independente umas das outras) deixou de ser recomendado devido às ambiguidades de especificação inerentes (ISO/TS 8062-2), algumas das quais já abordadas nas secções 6.2 e 6.6 deste texto.



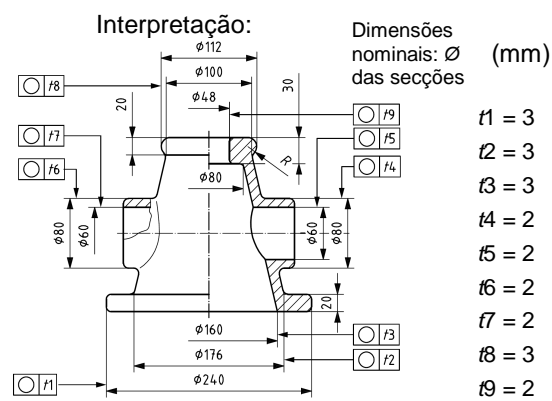
a) Desenho de definição



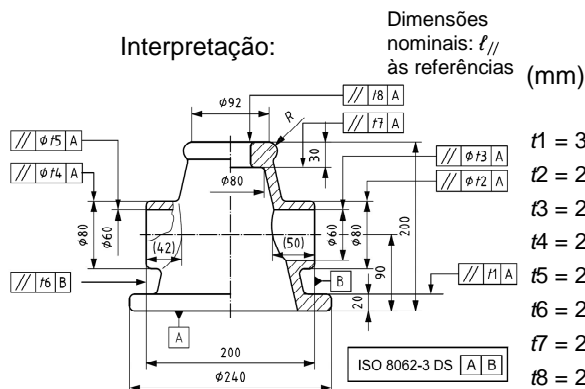
b) Tolerâncias gerais de rectitude



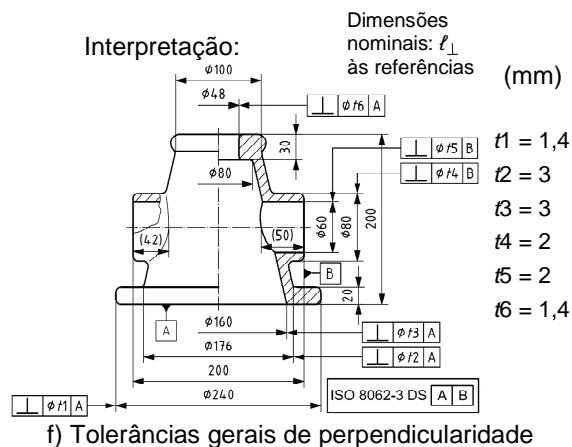
c) Tolerâncias gerais de planeza



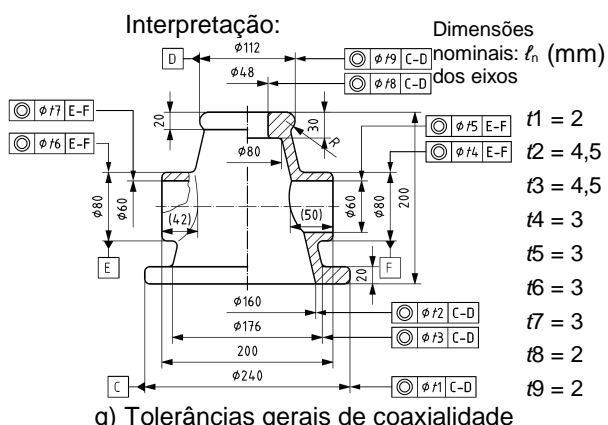
d) Tolerâncias gerais de circularidade



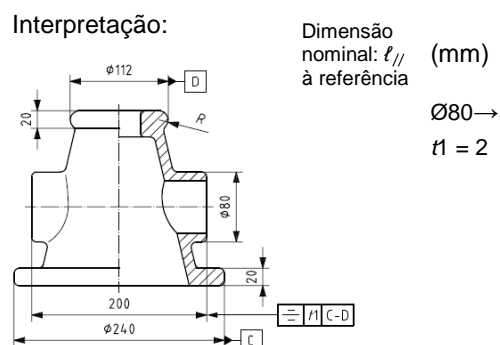
e) Tolerâncias gerais de paralelismo



f) Tolerâncias gerais de perpendicularidade



g) Tolerâncias gerais de coaxialidade



h) Tolerâncias gerais de simetria

Figura 9.27 – Interpretação do desenho de definição de uma peça em bruto de fundição em termos de tolerâncias geométricas gerais (ISO 8062-3)

#### 9.4.8 Algumas considerações gerais sobre a especificação geométrica de peças moldadas

Na produção de peças por moldação, em geral, e por fundição, em particular, deve ser dada uma atenção particular ao processo de moldação e à concepção do molde, uma vez que ambos influenciam a concepção da peça. Muitas vezes, é necessário modificar ligeiramente a geometria prevista de uma peça, com vista a evitar a ocorrência de imperfeições de superfície e a facilitar a sua desmoldagem. Os diferentes componentes do molde, tais como superfícies de apartação (*"parting surfaces"*), ataques (*"gates"*), alimentadores (*"risers"*), respiros (*"vents"*), extratores (*"ejectors"*), etc. (ver exemplos na figura 9.14) podem também dar origem a imperfeições de superfície indesejáveis, mas inevitáveis. Logo, a peça moldada resultante apresentará desvios em relação à sua forma geométrica ideal. Para controlar esses desvios, de modo a obter-se a função pretendida e assegurar-se de que a peça moldada pode ser reproduzida, em caso de substituição do molde (por exemplo, devido à sua rotura), é necessário que tais desvios admissíveis possam ser indicados e especificados nos desenhos técnicos.

Neste domínio, a norma ISO 10135 especifica regras e convenções para as indicações de requisitos para peças moldadas a inscrever na documentação técnica de produtos, em geral, e nos desenhos únicos de peças moldadas ou em bruto de fundição (*"single drawings of the final moulded parts"*), em particular. Adicionalmente, especifica, também, as proporções e as dimensões dos símbolos gráficos utilizados nessa representação.

Por sua vez, os documentos normativos da série ISO 8062 abordam, em termos globais, o processo de especificação de tolerâncias dimensionais e geométricas de peças moldadas. A parte 1 da ISO 8062 estabelece termos e definições relativos a elementos das peças, dos equipamentos e dos processos de fabricação, bem como relativos a desvios dimensionais e de superfície utilizados no processo de especificação dimensional e geométrica de peças moldadas.

A especificação técnica ISO 8062-2 estabelece regras de cotação e toleranciamento para peças moldadas (ou em bruto de fundição, em particular) e para peças moldadas submetidas a subsequente trabalho mecânico. Fornece também regras e convenções para as indicações desses requisitos na documentação técnica de produtos e símbolos que poderão ser utilizados para identificar o estado de evolução dos elementos e peças moldadas, no ciclo de fabricação.

Os métodos de toleranciamento, descritos neste documento – o método de acumulação e o método do toleranciamento múltiplo – não se enquadram ainda totalmente na nova linguagem GPS. Atendendo sobretudo à incerteza do cálculo das contrações (*"shrinking"*) registadas nas peças fundidas, após a sua solidificação, os requisitos para estas peças permanecem incompatíveis com as normas GPS. Normalmente, tenta-se compensar essas contrações durante a fabricação do respetivo modelo ou molde permanente, através da consideração de um aumento percentual (%) adequado



das suas dimensões. A título de exemplo, a referência [J1] apresenta um quadro com as taxas de contração de alguns dos metais de fundição mais importantes, mas adverte que os valores indicados devem ser vistos apenas como linhas de orientação, pois as contrações reais registadas durante a solidificação dos diferentes metais dependem de vários fatores de influência (composição do metal, método de moldação, temperatura de vazamento, conceção da peça, etc.).

Relativamente à aplicação do método de acumulação, já descrita na secção 9.4.5 deste texto, quando se utilizam tolerâncias dimensionais gerais, em conformidade com a ISO 8062-3, o documento ISO/TS 8062-2 refere que não existe ainda um modo perfeitamente definido de aplicação de regras para o cálculo das dimensões nominais da peça em bruto de fundição, a partir das dimensões da peça fundida após acabamento mecânico, tendo em conta as diversas influências em presença. Uma próxima versão desta especificação técnica deverá incluir processos mais realistas de cálculo das dimensões nominais das peças em bruto de fundição, estabelecendo modos de combinar dimensões lineares com zonas de tolerância conformes com a nova linguagem GPS.

Uma das razões para tal facto é a falta de um sistema apropriado de referências especificadas na peça. As tolerâncias dimensionais gerais (ISO 8062-3) aplicam-se independentemente umas das outras (sem um sistema de referências especificadas), tornando-se difícil ou quase impossível avaliar a configuração geral que a peça pode adquirir. Adicionalmente, estas tolerâncias (com desvios  $\pm$ ) aplicam-se não só a tamanhos ("sizes") mas também a distâncias entre eixos e a dimensões que definem contornos perfilados, o que não está em conformidade com a norma ISO 14405-2 (ver exemplo na figura 9.28).

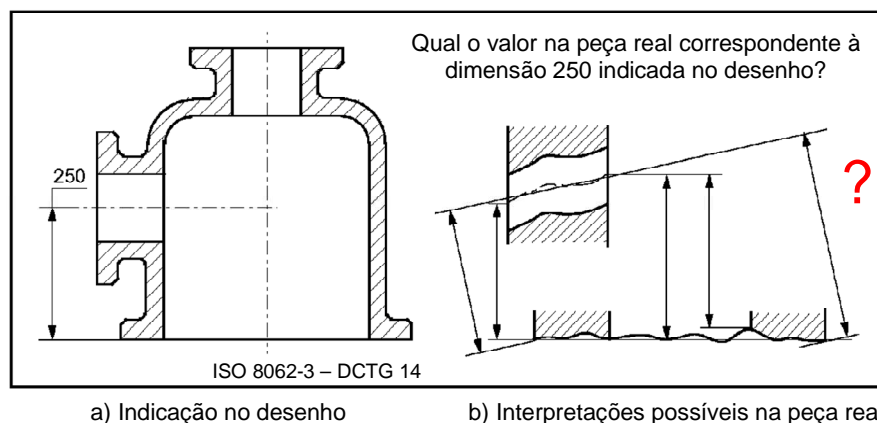


Figura 9.28 – Exemplo da ambiguidade resultante da utilização de desenhos com tolerâncias dimensionais gerais, em conformidade com a norma ISO 8062-3 [H2]

Finalmente, quando se utilizam os métodos descritos na ISO/TS 8062-2, em modelos em CAD 3D, são necessárias disposições com vista a poder fazer-se uma distinção entre dimensões teoricamente exatas (TEDs) e dimensões lineares e angulares com tolerâncias  $\pm$ . Em modelos em CAD 3D, as dimensões nominais nem sempre estão visíveis no modelo. Logo, as tolerâncias dimensionais, que dependem das dimensões nominais, deixam de poder ser utilizadas quando apenas se dispõe do modelo em CAD 3D (ver exemplo na figura 9.29).

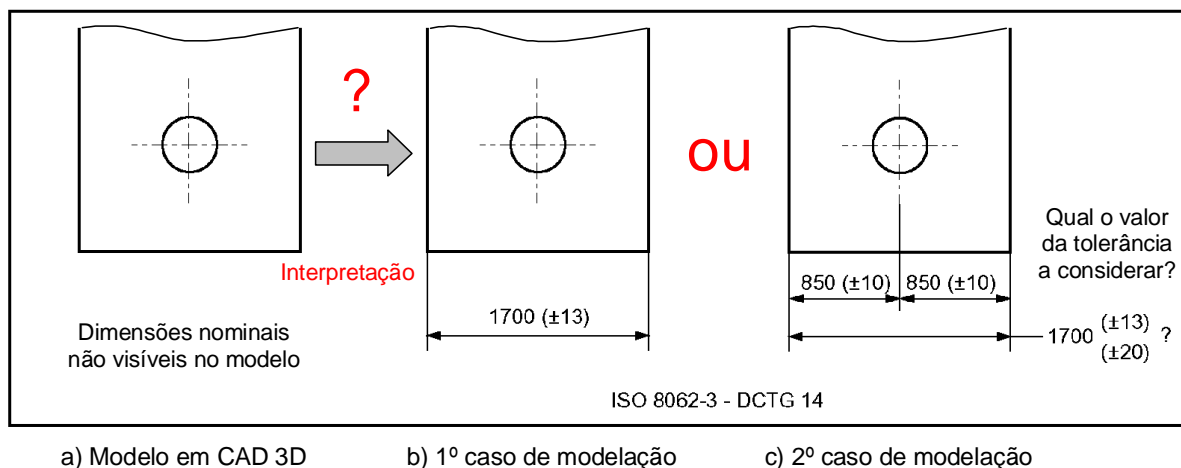


Figura 9.29 – Exemplo de uma interpretação ambígua resultante da utilização de tolerâncias dimensionais gerais, em conformidade com a ISO 8062-3, num modelo em CAD 3D (em que não estão visíveis as dimensões nominais utilizadas na sua modelação) [H2]

Com vista a ultrapassar as insuficiências da norma ISO 8062-3, atrás referidas, está em fase projeto (DIS) a Parte 4 da ISO 8062 que aborda a especificação de tolerâncias gerais para peças fundidas baseada na utilização do toleranciamento de perfil relacionado com um sistema geral de referências especificadas.

#### 9.4.9 Tolerâncias gerais para peças fundidas utilizando o toleranciamento de perfil em relação a um sistema geral de referências especificadas

A Parte 4 da norma ISO 8062 (ainda em elaboração) vai especificar tolerâncias geométricas gerais, sobre-espessuras para trabalho mecânico e ângulos de saída para peças fundidas, em todos os metais e suas ligas, produzidas através de vários processos de fabricação de peças fundidas.

O procedimento de especificação geométrica proposto no ISO/DIS 8062-4 é o mais adequado para permitir uma verificação geométrica de peças em bruto de fundição, baseada fundamentalmente em ficheiros de CAD 3D e efetuada por meio de máquinas de medição de coordenadas ou de braços articulados, utilizando técnicas de medição com ou sem contacto.

As tolerâncias gerais em conformidade com esta norma são tolerâncias geométricas do perfil de uma superfície, relacionadas com um sistema geral de referências especificadas, identificadas pelas letras R S T, que é recomendável que seja um sistema de referências parciais (*“datum target system”*). Este sistema é estabelecido por meio de seis referências parciais, para peças rígidas, e por um mínimo de seis referências parciais, para peças flexíveis, que devem ser indicadas no desenho (ver exemplo na figura 9.30).

Em princípio, as tolerâncias gerais do perfil de uma superfície aplicam-se a todas as superfícies da peça. Em casos especiais, poderão ser indicadas tolerâncias individuais do perfil de uma superfície,

maiores ou menores, para superfícies particulares, relacionadas com o mesmo sistema de referências especificadas e que se sobrepõem às tolerâncias gerais.

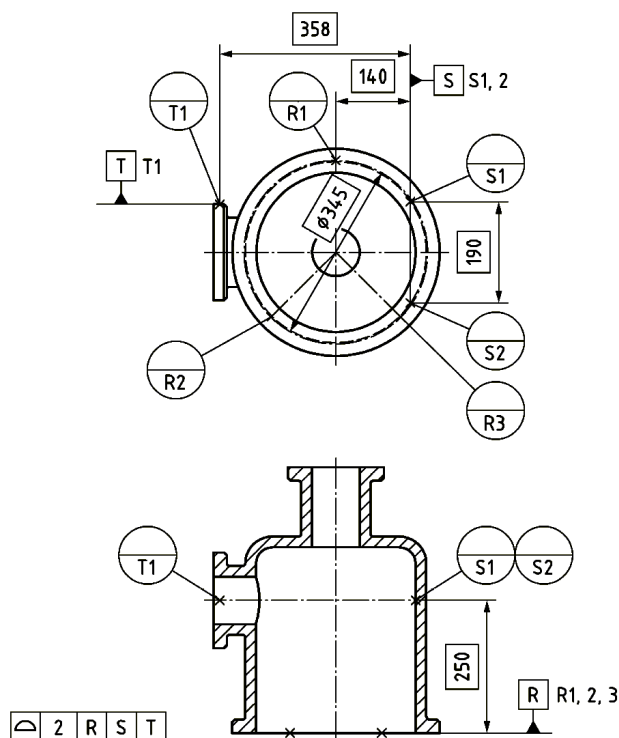


Figura 9.30 – Exemplo de especificação de um sistema geral de referências parciais, identificadas pelas letras RST (ISO/DIS 8062-4)

Para elementos de tamanho, poderão ser especificadas tolerâncias gerais de localização, relacionadas com o mesmo sistema de referências parciais (RST), que se vão sobrepor também às tolerâncias gerais do perfil de uma superfície. Outras tolerâncias indicadas individualmente são complementares, isto é aplicam-se, adicionalmente, como uma restrição suplementar às tolerâncias gerais (ver figura 9.31).

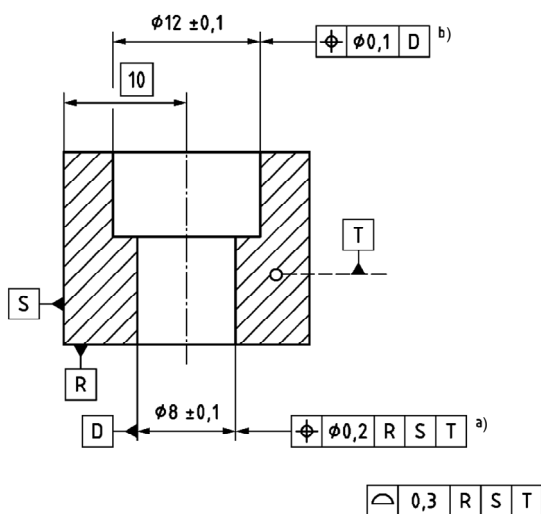


Figura 9.31 – Exemplo de tolerâncias de localização relacionadas diretamente (a) e indiretamente (b) com o sistema de referências especificadas, identificadas pelas letras RST (ISO/DIS 8062-4)

Só deverão ser utilizadas tolerâncias dimensionais, por omissão, com desvios simétricos ( $\pm t_0/2$ ), quando necessárias e apenas para diâmetros, em conjunto com tolerâncias de localização (gerais ou indicadas individualmente), e para espessuras de parede.

As tolerâncias gerais devem poder ser respeitadas sem quaisquer cuidados especiais e com uma probabilidade elevada, de modo a retirarem-se todas as vantagens económicas daí inerentes. Os valores a especificar para as tolerâncias gerais do perfil de uma superfície devem basear-se em medições de desvios efetuadas, a nível industrial, em peças de diferentes tamanhos, fora da produção normal, e coligidas em gráficos de frequências idênticos ao esquematizado na figura 9.32.

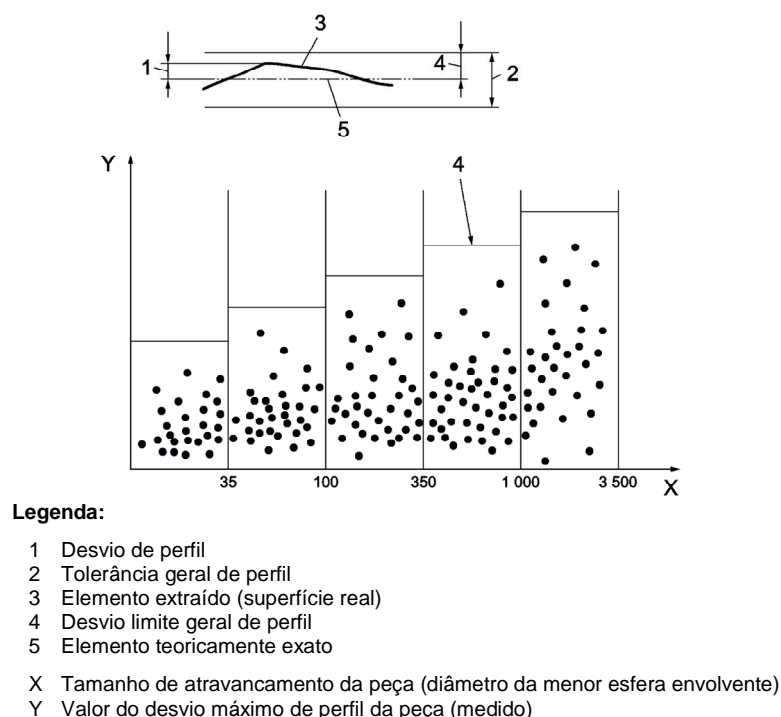


Figura 9.32 – Desvios de perfil de uma superfície derivados de medições ao nível da indústria (as tolerâncias gerais correspondem ao dobro dos desvios limites gerais de perfil). Adaptada do ISO/DIS 8062-4

A tolerância admitida pela função é muitas vezes superior à tolerância geral. Logo, a função da peça nem sempre é comprometida se a tolerância geral for (ocasionalmente) excedida num qualquer elemento da peça. A ultrapassagem de uma tolerância geral só deverá levar à rejeição da peça fundida se a função for afetada.

#### 9.4.9.1 Tolerâncias gerais

Nesta nova abordagem, as tolerâncias gerais do perfil de uma superfície, para peças em bruto de fundição, estão indicadas no quadro 9.13. Os valores destas tolerâncias estão relacionados com os tamanhos dos modelos nominais (não considerando os ângulos de saída) das peças fundidas, a partir dos diâmetros  $S\emptyset$  da menor esfera envolvente. Por omissão, a tolerância selecionada será constante em toda a peça fundida.

Quadro 9.13 – Tolerâncias gerais do perfil de superfícies de peças em bruto de fundição (ISO/DIS 8062-4)

Tamanhos das peças fundidas <sup>a)</sup> (mm)		Tolerâncias gerais do perfil de uma superfície para graus de tolerância P <sup>b)</sup> em mm														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
—	≤ 10	0,09	0,14	0,19	0,27	0,37	0,53	0,76	1,1	1,6	2,1	2,9	4,3	—	—	—
> 10	≤ 30	0,12	0,16	0,23	0,31	0,44	0,61	0,86	1,3	1,8	2,5	3,4	4,8	6,5	8,5	10,5
> 30	≤ 100	0,14	0,19	0,27	0,38	0,53	0,74	1,1	1,5	2,1	3	4,2	5,8	8,5	10,5	13
> 100	≤ 300	0,15	0,23	0,35	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	14	18
> 300	≤ 1000	—	—	0,42	0,64	0,8	1,3	1,9	2,7	3,8	5,5	7,5	10,5	15	19	23,5
> 1000	≤ 3000	—	—	—	—	—	1,6	2,4	3,8	5,4	8	10	15	21	26	33
> 3000	≤ 6300	—	—	—	—	—	—	—	—	7	10	13	19	26	33	41
> 6300	≤ 10 000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	16	23	32	40	50

<sup>a)</sup> Diâmetro da menor esfera envolvente do contorno nominal em bruto de fundição (diagonal espacial); na produção de grandes turbinas, utilizam-se tamanhos de peças fundidas até 10 000 mm.

<sup>b)</sup> O desencontro da superfície de apartação ("mismatch"), ver ISO 10135, está englobado na tolerância do perfil de uma superfície.

Os valores fornecidos no quadro 9.13, para os diferentes graus de tolerância, mantêm, no geral, a mesma relação de proporcionalidade entre os valores das tolerâncias e as dimensões nominais, que tinha sido adotada na ISO 8062-3 (ver quadro 9.6).

Com base em dados resultantes da experiência em fundição, os **graus de tolerância P** ("Profile") para tolerâncias gerais do perfil de uma superfície que, normalmente, se podem atingir com diferentes métodos, metais e ligas de fundição são idênticos aos já indicados nos quadros 9.7 e 9.8 para as tolerâncias dimensionais (consideradas na abordagem tradicional efetuada na ISO 8062-3).

Por sua vez, podem considerar-se três vias distintas para contabilizar os ângulos de saída:

- 1) O ângulo de saída já está incluído no modelo nominal, considerando-se que a zona de tolerância geral do perfil da superfície é simétrica em relação à superfície nominal.
- 2) O ângulo de saída é adicionado ao modelo nominal, considerando-se que a zona de tolerância geral do perfil da superfície é constante e simétrica em relação à superfície nominal [ver figura 9.33 a)].
- 3) O ângulo de saída é adicionado à zona de tolerância geral do perfil da superfície que aumenta gradualmente, mantendo-se constante a forma do modelo nominal [ver figura 9.33 b)].

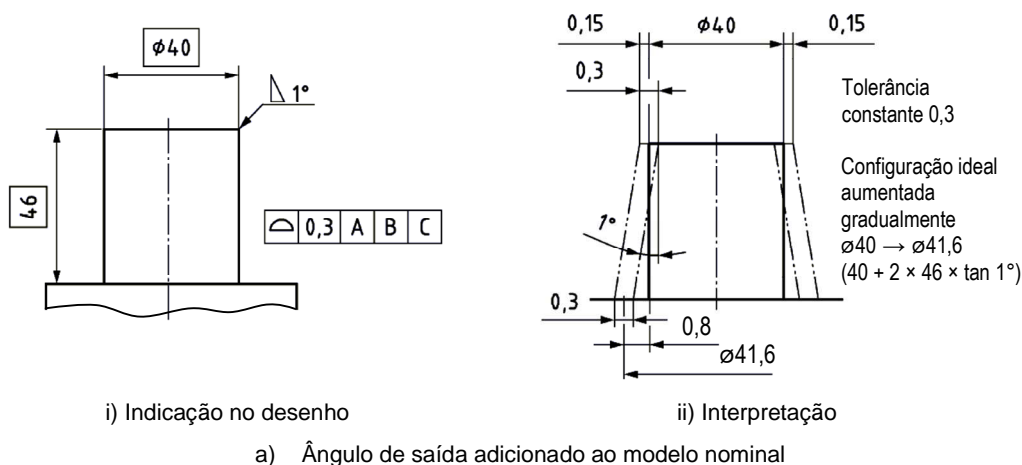


Figura 9.33 – Contabilização dos ângulos de saída nas zonas de tolerância. Adaptada do ISO/DIS 8062-4

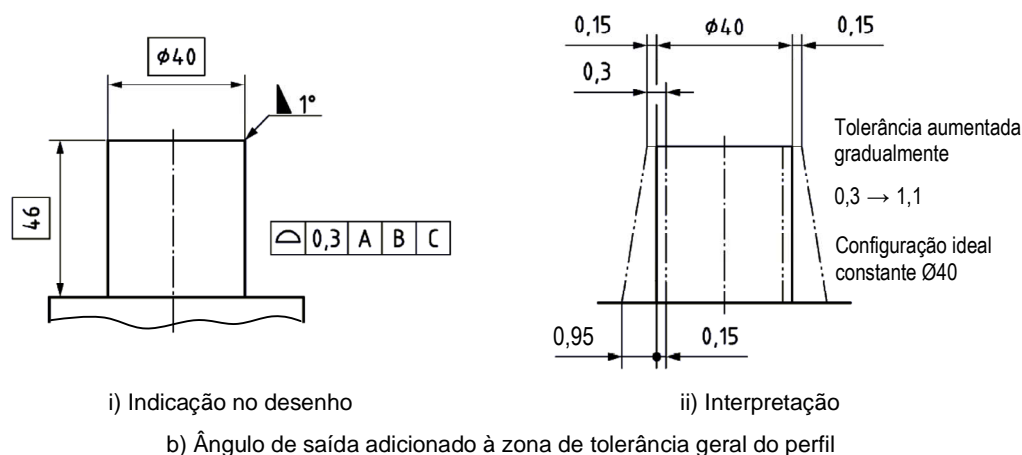


Figura 9.33 – Contabilização dos ângulos de saída nas zonas de tolerância. Adaptada do ISO/DIS 8062-4 (conclusão)

Salvo indicação em contrário, devem aplicar-se ângulos de saída crescentes (“*taper plus*”). A exceção a esta regra usa-se em elementos com o requisito de máximo de matéria, em que devem ser especificados ângulos de saída decrescentes (“*taper minus*”). Adicionalmente, o ISO/DIS 8062-4 fornece valores e indicações sobre os ângulos de saída a inscrever na indicação geral do desenho, em função do método de produção e do grau do ângulo de saída.

No quadro 9.14, indicam-se valores  $t_D$  de tolerâncias dimensionais para tamanhos (diâmetros) cilíndricos, utilizados como uma restrição adicional. Por omissão, os desvios respetivos são simétricos ( $\pm t_D/2$ ). Estas tolerâncias aplicam-se também em tamanhos estabelecidos por dois planos paralelos opostos, quando a dimensão está indicada explicitamente no desenho.

Quadro 9.14 – Tolerâncias dimensionais gerais para tamanhos cilíndricos e para espessuras de parede (ISO/DIS 8062-4)

Tamanhos das peças fundidas <sup>a)</sup> (mm)		Tolerâncias dimensionais gerais para graus de tolerância S															em mm	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
—	≤ 10	0,05	0,06	0,1	0,12	0,17	0,25	0,35	0,5	0,7	1	1,4	2	—	—	—		
> 10	≤ 30	0,06	0,07	0,12	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,2	1,7	2,5	3	4	5		
> 30	≤ 100	0,07	0,1	0,14	0,2	0,25	0,4	0,5	0,8	1	1,5	2	3	4	5	7		
> 100	≤ 300	0,08	0,12	0,17	0,25	0,35	0,5	0,7	1	1,4	2	3	4	5	7	9		

<sup>a)</sup> Valor do tamanho ou da espessura de parede do contorno nominal, em bruto de fundição.

Os valores  $t_D$  indicados no quadro 9.14 utilizam-se também, como restrição adicional, na especificação de tolerâncias dimensionais de espessuras de parede, com desvios simétricos ( $\pm t_D/2$ ), salvo indicação em contrário. Por omissão, para as espessuras de parede, utiliza-se um **grau de tolerância S** (“Size”) mais largo do que o adotado para os tamanhos.

#### 9.4.9.2 Sobre-espessuras requeridas para trabalho mecânico

Nesta nova abordagem, os valores das sobre-espessuras requeridas para trabalho mecânico (RMA) continuam a ser definidos, tal como na norma ISO 8062-3, em função de 10 graus de RMA, de acordo com quadro 9.11, para dimensões máximas de atravancamento até 10 000 mm. Os graus

recomendados, para métodos de produção, metais e ligas metálicas particulares, são os mesmos já indicados no quadro 9.12.

As dimensões nominais das peças em bruto de fundição devem ser determinadas em função das respectivas dimensões nominais após acabamento mecânico das peças, das tolerâncias de perfil após acabamento mecânico, da sobre-espessura requerida para trabalho mecânico (RMA) e das tolerâncias de perfil em bruto de fundição, conforme ilustram os exemplos apresentados na figura 9.34.

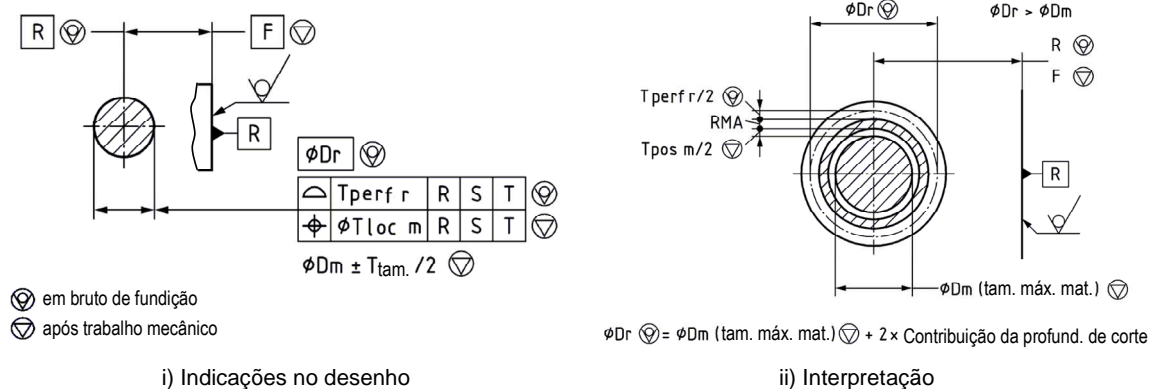
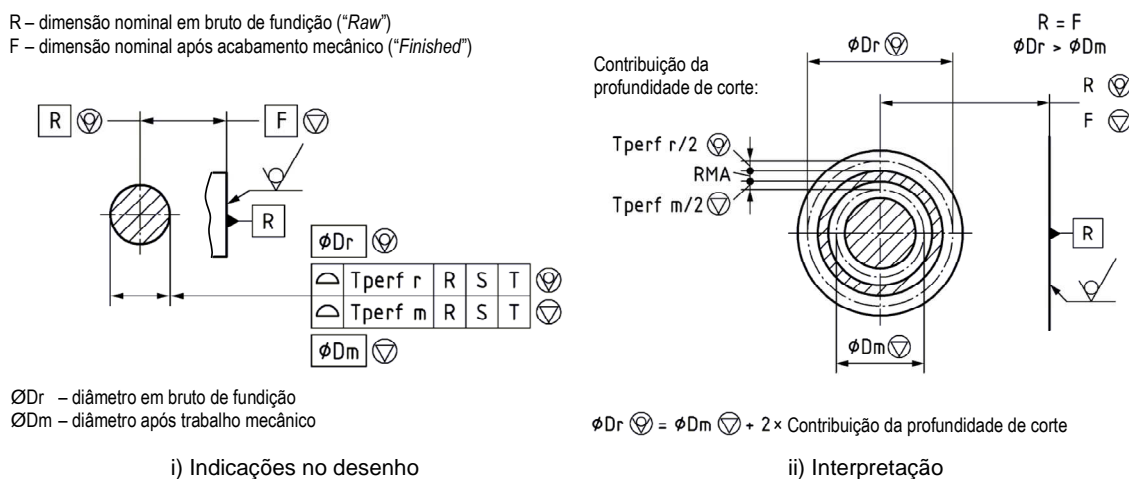
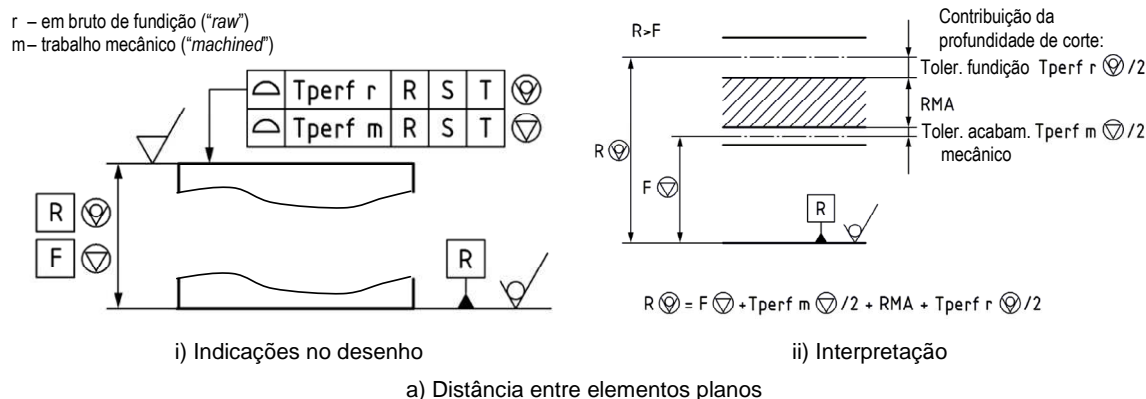


Figura 9.34 – Exemplos da determinação de dimensões nominais de peças em bruto de fundição. Adaptada do ISO/DIS 8062-4

### 9.4.9.3 Indicações nos desenhos

Para especificar tolerâncias gerais para peças fundidas, em conformidade com a Parte 4 da norma ISO 8062, devem indicar-se as seguintes informações, no interior ou junto da legenda do desenho:

- a) Tolerâncias gerais ISO 8062-4;
- b) a tolerância geral de perfil (P), em conformidade com o quadro 9.13;
- c) o grau de tolerância geral para tamanhos (S), em conformidade com o quadro 9.14;
- d) o grau de tolerância geral para espessuras de parede (S), em conformidade com o quadro 9.14;
- e) o valor da sobre-espessura requerida para trabalho mecânico (RMA), em conformidade com o quadro 9.11;
- f) o método de fabricação, em conjunto com o grau do ângulo de saída;
- g) o tamanho da peça fundida, isto é o diâmetro  $S\varnothing$  da menor esfera envolvente do contorno da peça em bruto de fundição;
- h) o(s) identificador(es) da condição da peça (em bruto de fundição, após acabamento mecânico, etc.).

Exemplo: **Tolerâncias gerais ISO 8062-4**



**Tamanhos S8**

**Espessuras de parede S9**

**RMA-2,5**

**Moldação à máquina DB**

**Tamanho da peça fundida  $S\varnothing 750$**



Neste exemplo, especificou-se uma tolerância geral do perfil das superfícies da peça em bruto de fundição de 3,8 mm (com  $S\varnothing 750$  e um grau de tolerância P9 derivado da peça ser obtida por moldação à máquina) relacionada com um sistema geral de referências especificadas, identificadas pelas letras R, S e T; graus de tolerância S8, para tamanhos e S9, para espessuras de parede; uma sobre-espessura mínima para trabalho mecânico de 2,5 mm, no grau E, para uma peça cuja dimensão máxima de atravancamento se situa no intervalo de 630 mm a 1000 mm; um grau DB de ângulo de saída (ver ISO/DIS 8062-4), no desenho combinado de uma peça com requisitos para superfícies em bruto de fundição e para superfícies após acabamento mecânico.



#### 9.4.9.4 Exemplo de aplicação a um desenho

Na figura 9.35, exemplifica-se como deve ser interpretado um desenho de definição de uma peça em bruto de fundição, em termos de tolerâncias gerais, com base nas indicações pertinentes nele inscritas.

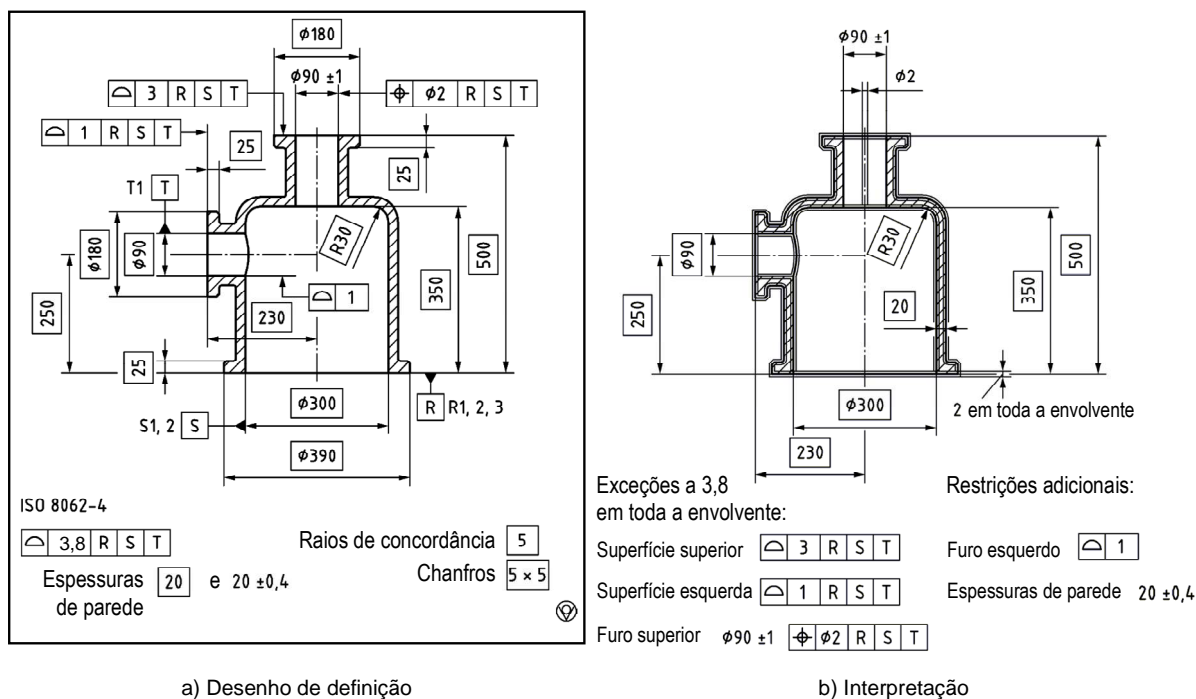


Figura 9.35 – Exemplo de utilização de tolerâncias gerais no desenho de uma peça em bruto de fundição com exceções e restrições adicionais (ISO/DIS 8062-4)

Neste exemplo, especificou-se uma tolerância geral do perfil das superfícies da peça em bruto de fundição de 3,8 mm (com  $300 < S\phi \leq 1000$  e um grau de tolerância P9) relacionada com um sistema geral de referências parciais (RST), ver também a figura 9.30. Não foram necessárias tolerâncias dimensionais gerais para elementos de tamanho cilíndricos; o desenho está incompleto no que diz respeito à superfície de apartação e aos ângulos de saída. Como, no desenho, há apenas uma espessura de parede de 20 mm, a sua tolerância dimensional geral foi indicada diretamente, correspondendo ao grau S9.

## 9.5 Tolerâncias gerais para construções soldadas (ISO 13920)

### 9.5.1 Introdução

A norma ISO 13920 especifica tolerâncias gerais para dimensões lineares e angulares e para características geométricas de forma e de orientação de estruturas soldadas (“*welded structures*”), em quatro classes de tolerância, baseadas na exatidão oficial corrente, que deverão ser selecionadas de acordo com os requisitos funcionais pretendidos.

As tolerâncias aplicáveis são sempre as que estão especificadas no desenho. Em alternativa à especificação de tolerâncias individuais, poderão utilizar-se as classes de tolerância em conformidade com esta norma (ver exemplo na figura 9.36).

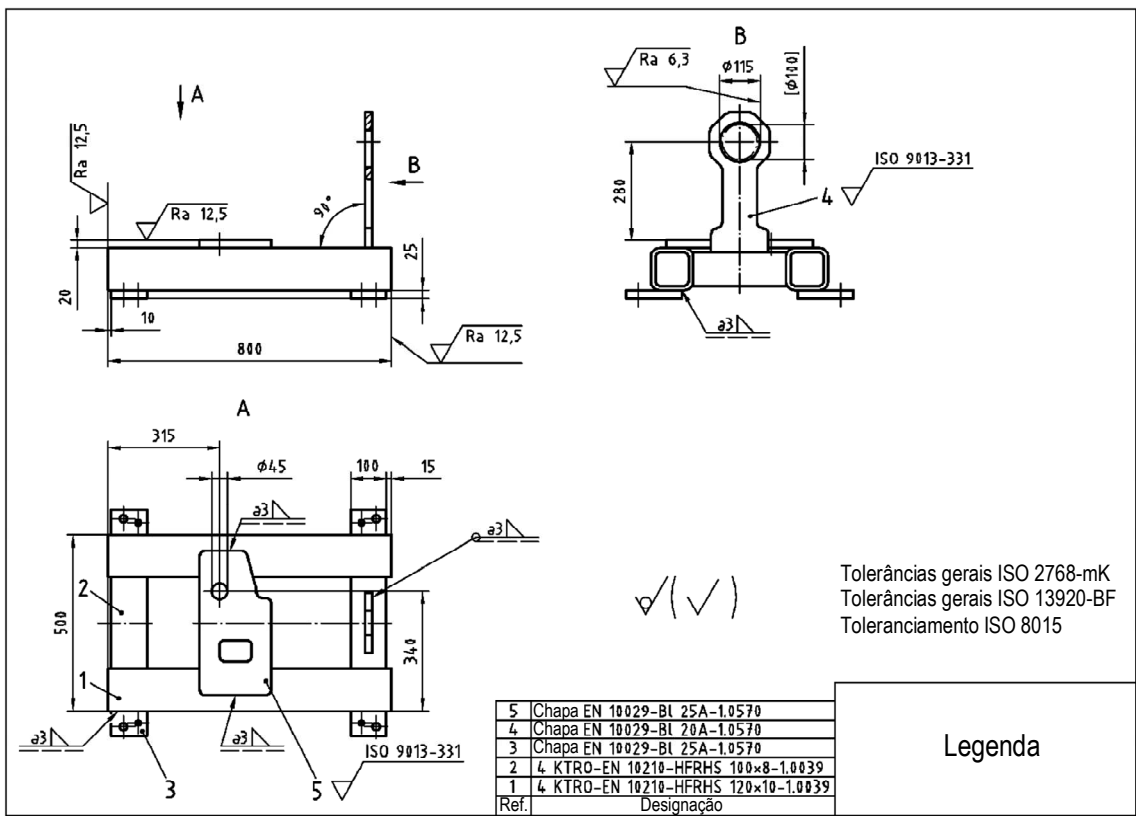


Figura 9.36 – Exemplo de um desenho de uma estrutura soldada. Adaptado da norma DIN 30630

As tolerâncias gerais para dimensões lineares e angulares e para características geométricas de forma e de orientação, especificadas nesta norma (ver quadros 9.15, 9.16 e 9.17), aplicam-se a ligações soldadas, componentes soldados, estruturas soldadas, etc. Para estruturas complexas, poderá ser necessária a aplicação de disposições especiais.

As especificações indicadas nesta norma são baseadas no **princípio de independência**, estabelecido na ISO 8015, de acordo com o qual as tolerâncias dimensionais e geométricas devem ser respeitadas independentemente umas das outras.

Toda a documentação de produção, na qual as dimensões lineares e angulares ou as características geométricas de forma e de orientação apareçam representadas sem indicações de tolerâncias individuais, deve ser considerada incompleta, se não existir qualquer referência a tolerâncias gerais ou esta for inadequada. Esta regra não se aplica a dimensões temporárias.

Os desvios geométricos derivados das deformações, resultantes das operações de soldadura realizadas nas peças, são variáveis e dependem dos processos (ver exemplos na figura 9.37) e dos dispositivos de fixação utilizados, da rigidez dos materiais a ligar e da conceção das juntas soldadas. Estas deformações resultam das contrações transversais e longitudinais do cordão de soldadura e são difíceis de evitar [Q1, S6] (ver exemplos na figura 9.38).

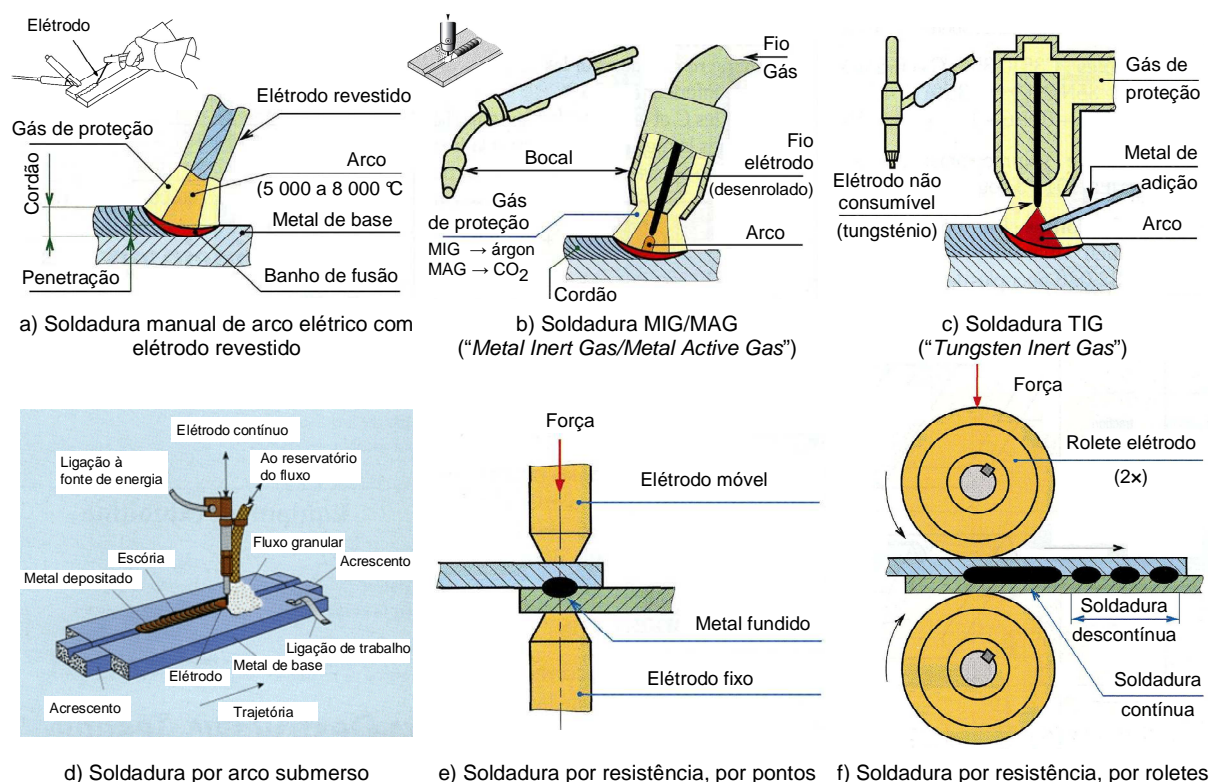


Figura 9.37 – Alguns exemplos de processos de soldadura. Adaptada de [S3]

Estas deformações podem ser minimizadas através de uma adequada conceção das construções soldadas, conforme pode ser constatado em diversas referências sobre este tema [F1, S2].

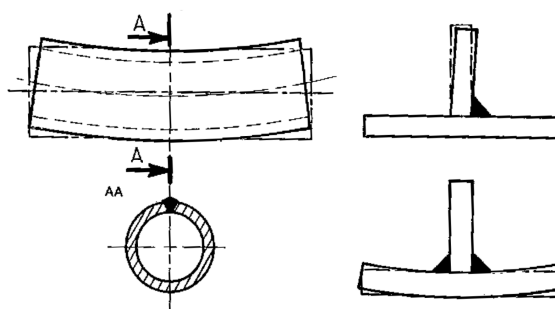


Figura 9.38 – Exemplos de deformações registadas em peças soldadas. Adaptada de [Q1]

Na figura 9.39, apresentam-se alguns exemplos de configurações de juntas soldadas que devem ser evitadas e de outras a adotar em alternativa, com vista a tentar reduzir o grau de deformação induzido, na estrutura, pelas operações de soldadura.

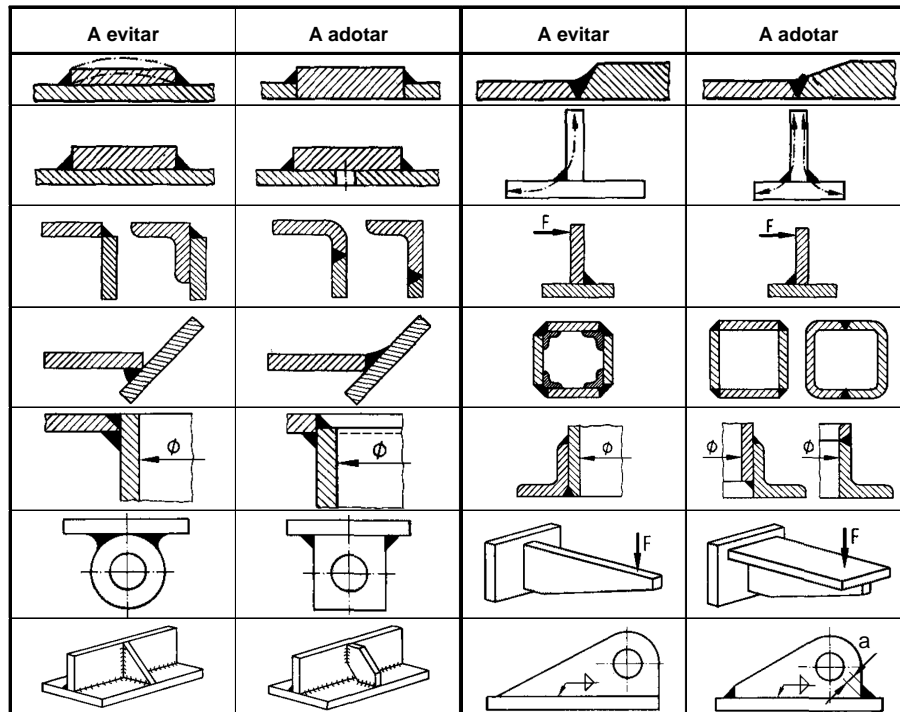


Figura 9.39 – Exemplos de concepções de juntas soldadas. Adaptada de [F1]

De acordo com a referência [S6], a norma ISO 13920 é também a mais adequada para os casos de estruturas soldadas pesadas onde a distorção derivada da soldadura é o fator dominante para a determinação das dimensões e da forma.

## 9.5.2 Tolerâncias gerais

Os valores das tolerâncias dimensionais lineares  $T_D$  e angulares  $T_\alpha$  estão indicados, nos quadros 9.15 e 9.16, em termos dos respetivos desvios admissíveis simétricos ( $\pm t_D/2$  e  $\pm \Delta_\alpha = \pm T_\alpha/2$ ), para cada uma das quatro classes de tolerância previstas: **A**, **B**, **C** e **D**. Os valores das tolerâncias dimensionais lineares são diretamente proporcionais às respetivas dimensões nominais.

Quadro 9.15 – Tolerâncias para dimensões lineares (ISO 13920)

Classe de tolerância	Intervalos de tamanhos nominais $l$ em mm									
	2 a 30	> 30 até 120	> 120 até 400	> 400 até 1000	> 1000 até 2000	> 2000 até 4000	> 4000 até 8000	> 8000 até 12000	> 12000 até 16000	> 16000 até 20000
	Desvios admissíveis $\pm t_D/2$ em mm (sendo $T_D = t_D$ )									
<b>A</b>	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 5$	$\pm 6$	$\pm 7$	$\pm 8$
<b>B</b>		$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 8$	$\pm 10$	$\pm 12$	$\pm 14$
<b>C</b>		$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 8$	$\pm 11$	$\pm 14$	$\pm 18$	$\pm 21$	$\pm 24$
<b>D</b>		$\pm 4$	$\pm 7$	$\pm 9$	$\pm 12$	$\pm 16$	$\pm 21$	$\pm 27$	$\pm 32$	$\pm 40$

Nas tolerâncias dimensionais angulares, os seus valores estão especificados em função do comprimento  $l$  do lado mais curto do ângulo  $\alpha$  considerado, verificando-se que a tolerância diminui com o aumento daquele comprimento, de acordo com a justificação já apresentada na secção 9.3.1.

Quadro 9.16 – Tolerâncias para dimensões angulares (ISO 13920)

Classe de tolerância	Intervalos de tamanhos nominais $l$ em mm (comprimento do lado mais curto)		
	Até 400	> 400 até 1000	> 1000
	Desvios admissíveis $\pm\Delta\alpha$ , em graus e minutos (sendo $T_\alpha = 2 \Delta\alpha$ )		
A	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 15'$	$\pm 0^\circ 10'$
B	$\pm 0^\circ 45'$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$
C	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 45'$	$\pm 0^\circ 30'$
D	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 1^\circ 15'$	$\pm 1^\circ$
	Desvios $\pm t$ calculados e arredondados, em mm/m <sup>1)</sup>		
A	$\pm 6$	$\pm 4,5$	$\pm 3$
B	$\pm 13$	$\pm 9$	$\pm 6$
C	$\pm 18$	$\pm 13$	$\pm 9$
D	$\pm 26$	$\pm 22$	$\pm 18$

<sup>1)</sup> O valor  $t$  indicado em mm/m corresponde ao valor da tangente do desvio admissível geral  $\Delta\alpha$ . Deve ser multiplicado pelo comprimento, em m, do lado mais curto.

Poder-se-á também considerar que o comprimento  $l$  do lado mais curto se prolonga até a um ponto de referência especificado. Neste caso, o respetivo ponto de referência deve ser indicado no desenho, conforme se exemplifica nas figuras 9.40 a) a e).

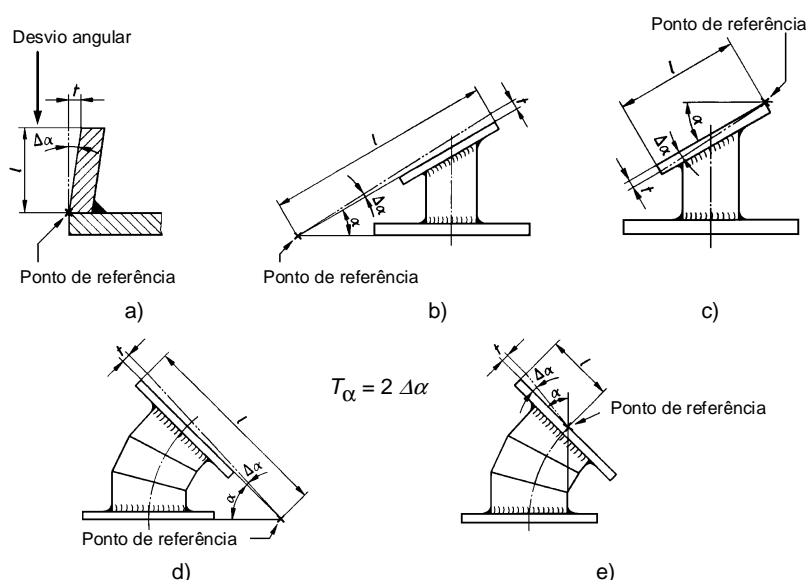


Figura 9.40 – Exemplos de comprimento do lado mais curto do ângulo e ponto de referência considerados, em função do ângulo  $\alpha$  especificado (ISO 13920)

Finalmente, os valores das tolerâncias geométricas de retitude, planeza e paralelismo estão indicados, no quadro 9.17, para cada uma das quatro classes de tolerância previstas: **E**, **F**, **G** e **H**. Aplicam-se quer às dimensões globais de uma ligação soldada, de um componente soldado ou de uma estrutura soldada, quer a secções com indicações de dimensões.

Outras tolerâncias geométricas de forma e posição tais como, por exemplo, de coaxialidade e de simetria não foram especificadas. Se tais tolerâncias forem requeridas, por razões funcionais, elas devem ser indicadas individualmente nos desenhos, em conformidade com a ISO 1101.

Quadro 9.17 – Tolerâncias de retitude, planeza e paralelismo (ISO 13920)

Classe de tolerância	Intervalo de tamanhos nominais $l$ em mm (relativos ao lado maior da superfície)									
	> 30 até 120	> 120 até 400	> 400 até 1000	> 1000 até 2000	> 2000 até 4000	> 4000 até 8000	> 8000 até 12000	> 12000 até 16000	> 16000 até 20000	> 20000
	Tolerâncias $t_g$ em mm									
<b>E</b>	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8
<b>F</b>	1	1,5	3	4,5	6	8	10	12	14	16
<b>G</b>	1,5	3	5,5	9	11	16	20	22	25	25
<b>H</b>	2,5	5	9	14	18	26	32	36	40	40

### 9.5.3 Indicações nos desenhos

Para especificar tolerâncias gerais, em conformidade com a norma ISO 13920, deve indicar-se a seguinte informação, no interior ou junto da legenda do desenho:

- Tolerâncias gerais ISO 13920;
- a classe de tolerância para as dimensões, se necessário, combinada com
- a classe de tolerância para a geometria.

Exemplos: **Tolerâncias gerais ISO 13920–B**

**Tolerâncias gerais ISO 13920–BE**

A título meramente informativo, podem referir-se alguns exemplos de aplicação de classes de tolerância desta norma:

A norma EN 1090-2 – *Requisitos técnicos para estruturas em aço*, para construção metálica e mista, admite a utilização da ISO 13920-**CG**, como critério alternativo ao estabelecido no seu Anexo D.2, na verificação da conformidade das tolerâncias funcionais (as consideradas para responder a critérios tais como a boa concordância da ligação e o aspeto) em estruturas soldadas.

A Energinet.dk [E1] especifica, para estruturas *offshore* em aço, as classes de tolerância **B** (em elementos estruturais especiais e primários) e **C** (em elementos estruturais secundários), para as dimensões, e as classes **E** (em elementos estruturais especiais e primários) e **F** (em elementos estruturais secundários), para a geometria, no que respeita a ligações soldadas, componentes soldados e estruturas soldadas.

A referência [B1] recomenda tolerâncias dimensionais de juntas soldadas em função da espessura  $t$  dos elementos a ligar, indicando uma classe de tolerância **B**, para  $t < 5$ , e uma classe **C**, para  $t > 5$ .

O documento Bosch-Norm 4497026418 (no âmbito das tecnologias automóvel e industrial, da termotecnologia, dos eletrodomésticos, etc.) recomenda, por omissão, as classes de tolerância **A** (dimensões) e **E** (geometria) para utilização preferencial em construções soldadas e a norma MMN 332 da MTU Friedrichshafen GmbH [M1] (nos domínios dos motores diesel e sistemas de propulsão em geral) especifica as classes de tolerância ISO 13920-**BF** para o mesmo fim.

Finalmente, a diretiva RLAAAA002\_en da TyssenKrupp System Engineering [S7] (no âmbito dos sistemas de montagem, dispositivos de ensaio, sistemas e ferramentas de conformação, etc.) especifica as classes de tolerância **B** (dimensões) e **E** (geometria) para utilização em construções soldadas.

## 9.6 Tolerâncias gerais relativas a outros processos de fabricação

A especificação de tolerâncias gerais para características geométricas de peças obtidas por outros processos de fabricação relevantes a nível industrial, que não foram ainda objeto de um tratamento desenvolvido no âmbito da ISO, deverá basear-se nas várias normas nacionais existentes em diferentes países. A título de exemplo, neste trabalho, faz-se referência a tolerâncias gerais para peças obtidas por processos de trabalho de chapas em aço e para peças obtidas por moldação em plástico.

### 9.6.1 Tolerâncias gerais para peças em chapa de aço obtidas através de corte por arrombamento e de conformação plástica

A norma DIN 6930-2 especifica tolerâncias gerais para dimensões lineares e angulares e para características geométricas de posição (coaxialidade e simetria) de peças em chapa de aço obtidas através de corte por arrombamento ("*flat stampings*") e através de conformação plástica ("*stampings made by forming*"), em quatro classes de tolerância (ver quadros 9.18 a 9.22): **f** (fina), **m** (média), **g** (grosseira) e **sg** (muito grosseira), que deverão ser selecionadas tendo em consideração a exatidão oficial corrente.

As tolerâncias gerais especificadas nesta norma têm em conta os aspetos particulares do trabalho de metais em chapa. Todas as dimensões (espessuras e ângulos) referem-se ao tamanho nominal e não às dimensões reais sujeitas a tolerâncias. No caso de utilização de uma ferramenta típica de corte por arrombamento (cortante), constituída por um punção e uma matriz ("*blanking tool*"), as tolerâncias aplicam-se à zona de penetração das superfícies das peças obtidas por corte ("*blanked stampings*") [ver figura 3.41 a)].

A posição e o tamanho da zona de repuxamento, da zona de rotura e da rebarba poderão afetar o desempenho da peça. No caso de peças produzidas através de corte por puncionamento ("*nibbling*"), o tamanho real é a dimensão medida a partir dos picos da superfície ondulada [ver figura 3.41 b)].

O tamanho real de uma peça em chapa poderá ser influenciado pela tolerância da espessura do produto plano utilizado. O facto desta espessura poder ser alterada durante a quinagem ou a embutidura deve também ser tido em consideração.

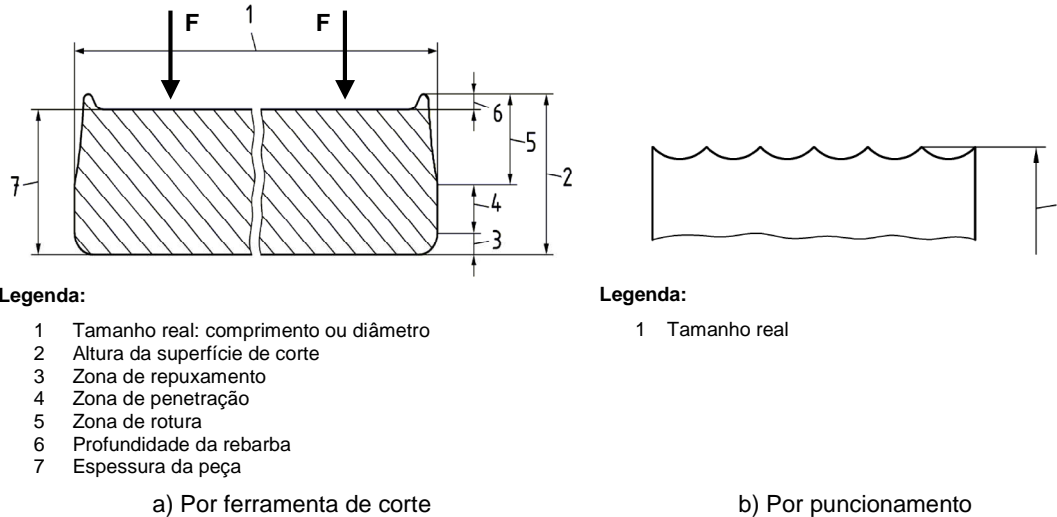


Figura 9.41 – Determinação do tamanho real de peças obtidas através de corte por arrombamento. Adaptada da norma DIN 6930-2

### 9.6.1.1 Tolerâncias gerais para peças obtidas através de corte por arrombamento

As peças obtidas através de corte por arrombamento devem ser realizadas a partir de produtos planos [utilizando uma tesoura/guilhotina (“*shearing tool*”) ou uma ferramenta de corte – cortante (“*blanking tool*”)]. No quadro 9.18, indicam-se os valores  $t_D$  das tolerâncias para todas as dimensões lineares, incluindo os diâmetros, de peças planas, em termos dos respetivos desvios admissíveis simétricos, com a exceção dos raios de curvatura que estão especificados no quadro 9.19.

Quadro 9.18 – Tolerâncias gerais para dimensões lineares de peças planas obtidas por processos de corte por arrombamento, com a exceção dos raios de curvatura (DIN 6930-2)

Classe de tolerância	Espessura da chapa [mm]	Desvios admissíveis $\pm t_D/2$ [mm] (sendo $T_D = t_D$ )							
		Intervalos de tamanhos nominais [mm]							
		$\leq 6$	$> 6$ até 10	$> 10$ até 25	$> 25$ até 63	$> 63$ até 160	$> 160$ até 400	$> 400$ até 1000	$> 1000$ até 6300
Fina f	$\leq 1$	$\pm 0,05$	$\pm 0,08$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$
	$> 1$ até 3	$\pm 0,08$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$
	$> 3$ até 6	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$
	$> 6$ até 10	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 1$
	$> 10$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1$
Média m	$\leq 1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$
	$> 1$ até 3	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,5$
	$> 3$ até 6	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 1$	$\pm 1,5$
	$> 6$ até 10	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 2$
	$> 10$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	$\pm 2$
Grosseira g	$\leq 1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 1$	$\pm 1,6$	$\pm 2,5$
	$> 1$ até 3	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2,5$
	$> 3$ até 6	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 2$	$\pm 3$
	$> 6$ até 10	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2$	$\pm 4$
	$> 10$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$
Muito grosseira sg	$\leq 1$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 4$
	$> 1$ até 3	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 4$
	$> 3$ até 6	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 3$	$\pm 4$
	$> 6$ até 10	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 4$
	$> 10$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 4$



Quadro 9.19 – Tolerâncias gerais para raios de curvatura de peças planas obtidas por processos de corte por arrombamento (DIN 6930-2)

Classe de tolerância	Espessura da chapa [mm]	Desvios admissíveis $\pm t_D/2$ [mm] (sendo $T_D = t_D$ )						
		Intervalos de tamanhos nominais [mm]						
		$\leq 6$	$> 6$ até 10	$> 10$ até 25	$> 25$ até 63	$> 63$ até 160	$> 160$ até 400	$> 400$
Fina f	$\leq 1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 1,6$
	$> 1$ até 3	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 1,0$	$\pm 1,2$	$\pm 2,0$
Média m	$> 3$ até 6	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	$\pm 2,2$
	$> 6$ até 10	–	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 1,4$	$\pm 1,8$	$\pm 2,5$
Grosseira g	$\leq 1$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 1,6$	$\pm 2,0$	$\pm 3,2$
	$> 1$ até 3	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 1,2$	$\pm 2,0$	$\pm 2,4$	$\pm 4,0$
Muito grosseira sg	$> 3$ até 6	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2,4$	$\pm 3,0$	$\pm 4,4$
	$> 6$ até 10	–	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2,0$	$\pm 2,8$	$\pm 3,6$	$\pm 5,0$
	$> 10$	–	–	$\pm 2,0$	$\pm 2,4$	$\pm 3,2$	$\pm 4,0$	$\pm 6,0$

As tolerâncias gerais para dimensões angulares de peças planas obtidas através de corte por arrombamento, indicadas no quadro 9.20, aplicam-se independentemente das dimensões lineares reais, isto é, os desvios angulares são admissíveis para peças quer com tamanhos de máximo de matéria quer com tamanhos de mínimo de matéria. Estas tolerâncias não afetam as tolerâncias de forma dos lados ou faces de um ângulo.

Quadro 9.20 – Tolerâncias gerais para dimensões angulares de peças planas obtidas por processos de corte por arrombamento (DIN 6930-2)

Classe de tolerância	Desvios admissíveis $\pm A_\alpha$ em unidades angulares (sendo $T_\alpha = 2 \Delta\alpha$ )							
	Intervalos de tamanhos nominais do lado mais curto [mm]							
	$\leq 6$	$> 6$ até 10	$> 10$ até 25	$> 25$ até 63	$> 63$ até 160	$> 160$ até 400	$> 400$ até 1000	$> 1000$ até 2500
f	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 5'$	$\pm 0^\circ 5'$
m	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 50'$	$\pm 0^\circ 50'$	$\pm 0^\circ 25'$	$\pm 0^\circ 15'$	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 10'$
g e sg	$\pm 3^\circ$	$\pm 3^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 20'$

Finalmente, em termos de tolerâncias geométricas gerais, dadas a classe de tolerância e a espessura  $t$  do produto, a tolerância de coaxialidade de dois elementos é determinada, em função do tamanho nominal do maior dos elementos de forma em consideração, a partir dos valores do quadro 9.18 [ver exemplo na figura 9.42 a)], tal como a tolerância de simetria de dois elementos é também determinada, em função do tamanho nominal do maior dos elementos de forma em consideração, a partir dos valores do quadro 9.18 [ver exemplo na figura 9.42 b)].

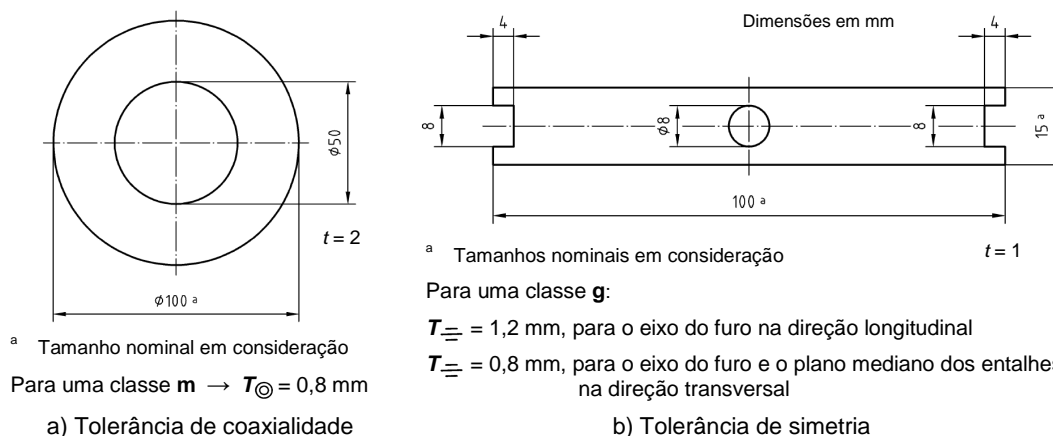


Figura 9.42 – Exemplos de determinação de tolerâncias gerais de coaxialidade e de simetria de peças planas. Adaptada da norma DIN 6930-2

### 9.6.1.2 Tolerâncias gerais para peças obtidas através de conformação plástica de chapa

As peças produzidas por conformação plástica são entendidas como sendo aquelas que foram submetidas a, pelo menos, uma operação de conformação [por exemplo, quinagem/dobragem (“*bending*”), embutidura (“*deep drawing*”)] e que, por isso, não são planas. Estas peças poderão também apresentar elementos de forma planos (por corte) cujas tolerâncias dimensionais não são afetadas pela operação de conformação.

No quadro 9.21, indicam-se os valores  $t_b$  das tolerâncias para todas as dimensões lineares, incluindo os diâmetros, de peças obtidas por conformação, em termos dos respectivos desvios admissíveis simétricos, com a exceção dos raios de curvatura que estão especificados no quadro 9.22.

Quadro 9.21 – Tolerâncias gerais para dimensões lineares de peças obtidas por conformação plástica, com a exceção dos raios de curvatura (DIN 6930-2)

Classe de tolerância	Espessura da chapa [mm]	Desvios admissíveis $\pm t_b/2$ [mm] (sendo $T_D = t_b$ )							
		Intervalos de tamanhos nominais [mm]							
		$\leq 6$	$> 6$ até 10	$> 10$ até 25	$> 25$ até 63	$> 63$ até 160	$> 160$ até 400	$> 400$ até 1000	$> 1000$ até 6300
Fina f	$\leq 1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,16$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	$\pm 1,6$
	$> 1$ até 3	$\pm 0,16$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,6$
	$> 3$ até 6	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 1$	$\pm 1,6$
	$> 6$ até 10	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 2$
	$> 10$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,6$	$\pm 2$
Média m	$\leq 1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 1$	$\pm 1,6$	$\pm 2,4$
	$> 1$ até 3	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 3$
	$> 3$ até 6	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 2$	$\pm 3$
	$> 6$ até 10	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2$	$\pm 4$
	$> 10$	$\pm 0,8$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$
Grosseira g	$\leq 1$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 2$	$\pm 3,2$	$\pm 5$
	$> 1$ até 3	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2,4$	$\pm 3,2$	$\pm 5$
	$> 3$ até 6	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2$	$\pm 2,4$	$\pm 4$	$\pm 6$
	$> 6$ até 10	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 1,6$	$\pm 2$	$\pm 2,4$	$\pm 3,2$	$\pm 4$	$\pm 8$
	$> 10$	$\pm 1,6$	$\pm 1,6$	$\pm 1,8$	$\pm 2,4$	$\pm 3,2$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 8$
Muito grosseira sg	$\leq 1$	$\pm 1$	$\pm 1,6$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 5$	$\pm 8$
	$> 1$ até 3	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 5$	$\pm 8$
	$> 3$ até 6	$\pm 1,6$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 5$	$\pm 6$	$\pm 8$
	$> 6$ até 10	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 6$	$\pm 8$	$\pm 8$
	$> 10$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 6$	$\pm 6$	$\pm 8$	$\pm 8$

Quadro 9.22 – Tolerâncias gerais para raios de curvatura (produzidos por corte, quinagem/dobragem ou embutidura) de peças obtidas por conformação plástica (DIN 6930-2)

Classe de tolerância	Espessura da chapa [mm]	Desvios admissíveis $\pm t_b/2$ [mm] (sendo $T_D = t_b$ )							
		Intervalos de tamanhos nominais [mm]							
		$\leq 6$	$> 6$ até 10	$> 10$ até 25	$> 25$ até 63	$> 63$ até 160	$> 160$ até 400	$> 400$ até 1000	
Fina f	$\leq 1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	
	$> 1$ até 3	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	
	$> 3$ até 6	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	
	$> 6$ até 10	–	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 3$	
	$> 10$	–	–	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 3$	$\pm 4$	
Média m	$\leq 1$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	
	$> 1$ até 3	$\pm 0,6$	$\pm 1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 4$	
	$> 3$ até 6	–	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	
	$> 6$ até 10	–	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 10$	
	$> 10$	–	–	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 10$	$\pm 15$	
Grosseira g	$\leq 1$	$\pm 0,6$	$\pm 1,2$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 10$	
	$> 1$ até 3	–	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 10$	$\pm 15$	
	$> 3$ até 6	–	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 10$	$\pm 15$	$\pm 25$	
	$> 6$ até 10	–	–	–	–	$\pm 15$	$\pm 25$	$\pm 40$	
	$> 10$	–	–	–	–	$\pm 25$	$\pm 40$	$\pm 60$	
Muito grosseira sg	$\leq 1$	–	$\pm 1,6$	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 10$	$\pm 15$	
	$> 1$ até 3	–	$\pm 2$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 10$	$\pm 15$	$\pm 25$	
	$> 3$ até 6	–	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 10$	$\pm 15$	$\pm 25$	
	$> 6$ até 10	–	–	–	–	$\pm 15$	$\pm 25$	$\pm 40$	
	$> 10$	–	–	–	–	$\pm 25$	$\pm 40$	$\pm 60$	

As tolerâncias gerais para dimensões angulares de peças obtidas por conformação plástica aplicam-se independentemente das dimensões lineares reais, isto é, os desvios angulares são admissíveis para peças, quer com tamanhos de máximo de matéria, quer com tamanhos de mínimo de matéria. Estas tolerâncias não afetam as tolerâncias de forma dos lados ou faces que limitam um ângulo. Para ângulos produzidos por dobragem/quinagem, aplicam-se as tolerâncias especificadas na norma DIN 6935, para a dobragem a frio, para todas as classes de tolerância. Uma vez que a DIN 6930-2 também cobre a produção de peças obtidas por conformação a quente, as tolerâncias para dimensões angulares especificadas na norma DIN 6935 também se aplicam a tais peças.

Finalmente, em termos de tolerâncias geométricas gerais, dadas a classe de tolerância e a espessura  $t$  do produto, as tolerâncias de coaxialidade e de simetria aplicam-se em função do tamanho nominal do maior dos elementos de forma em consideração, a partir dos valores do quadro 9.21, (ver exemplo de um perfil em U, na figura 9.43).

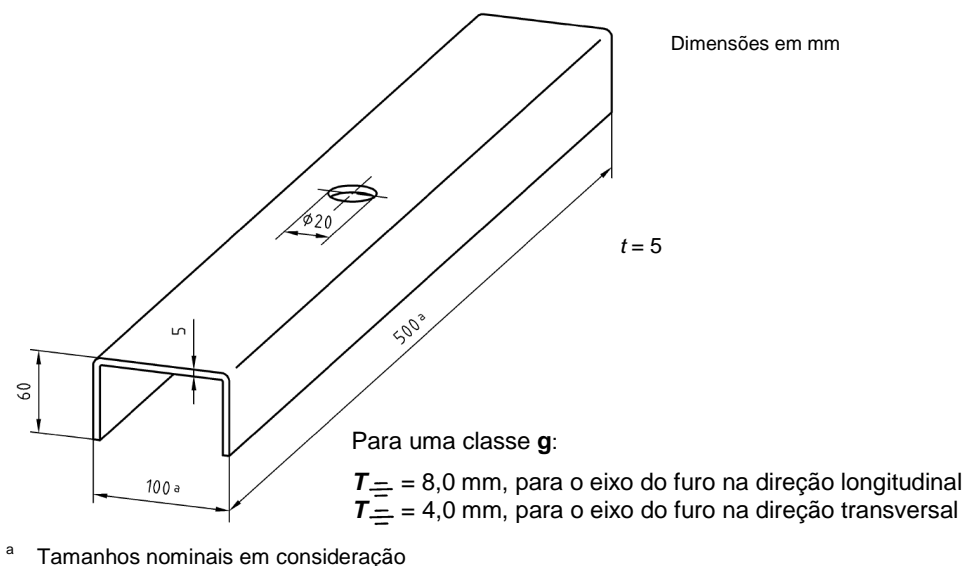


Figura 9.43 – Exemplo de determinação de tolerâncias gerais de simetria numa peça em chapa obtida através de conformação plástica. Adaptada da norma DIN 6930-2

O quadro 9.21 não se aplica se os elementos de forma, para os quais é requerida uma posição de coaxialidade ou simetria, estiverem localizados em planos diferentes da peça.

### 9.6.1.3 Comparação entre as tolerâncias gerais especificadas nas normas DIN 6930-2 e ISO 2768-1

A análise dos valores das tolerâncias gerais para dimensões lineares, indicados nos quadros 9.18 e 9.21, permite constatar que a variação dimensional prevista na norma DIN 6930-2, em resultado de operações correntes de conformação plástica de peças em chapa, é dupla da respetiva variação esperada, no mesmo documento, para peças planas obtidas por processos de corte por arrombamento. Verifica-se também que, ao contrário do registado nos restantes processos de fabricação já abordados, os valores das tolerâncias dependem não só dos valores das

correspondentes dimensões nominais mas também dos valores das espessuras das chapas, comprovando-se que a qualidade corrente do trabalho de peças em chapa de aço diminui com o aumento da espessura da chapa.

Em seguida, comparando os valores das tolerâncias gerais para dimensões lineares dos quadros 9.18 e 9.21 com idênticos valores apresentados no quadro 9.3, uma vez que a norma ISO 2768-1 admite a sua utilização em processos de conformação plástica de chapas metálicas, quando não estejam disponíveis outras normas relevantes, podem extrair-se as seguintes conclusões:

- a) na ISO 2768-1, a espessura das chapas não tem qualquer influência na especificação de tolerâncias gerais para dimensões lineares;
- b) no âmbito dos processos de corte por arrombamento, existe uma correspondência assinalável entre os valores das tolerâncias do quadro 9.3 e os valores do quadro 9.18, nas classes fina e média, para espessuras de chapa até 3 mm; nas classes grosseira e muito grosseira essa correspondência dispersa-se por um intervalo maior de espessuras de chapa que se alarga para intervalos crescentes de tamanhos nominais;
- c) no que diz respeito aos processos de conformação plástica (quinagem/dobragem, embutidura) de peças em chapa, os valores das tolerâncias do quadro 9.21 são razoavelmente maiores (cerca do dobro, no mínimo, para pequenas espessuras) do que os valores do quadro 9.3, o que desaconselha a utilização da ISO 2768-1 neste tipo de processos de fabricação;
- d) Em termos de tolerâncias angulares, constata-se que os valores correspondentes às classes de tolerância fina e muito grosseira, das duas normas, são muito semelhantes, mas os valores indicados para as classes média e grosseira da DIN 6930-2 são mais elevados, equivalendo aos valores das classes grosseira e muito grosseira, da ISO 2768-1.

### 9.6.1.4 Indicação nos desenhos

Para especificar tolerâncias gerais, em conformidade com a norma DIN 6930-2, deve indicar-se a seguinte informação, no interior ou junto da legenda do desenho:

- a) Tolerâncias gerais DIN 6930-2;
- b) a classe de tolerância para as dimensões e geometria

Exemplo: **Tolerâncias gerais DIN 6930-2 – m**

## 9.6.2 Tolerâncias gerais para peças obtidas por moldação em plástico

### 9.6.2.1 Introdução

Em geral, na utilização e na fabricação de peças de plástico obtidas por moldação (*“plastic moulded parts”*), é previsível a ocorrência de desvios dimensionais e geométricos (de forma e de posição) significativamente superiores aos que resultariam do emprego de materiais metálicos. Atendendo a propriedades características dos plásticos, tais como a elevada deformabilidade e a baixa rigidez, os seus requisitos de exatidão funcional são muito inferiores aos dos metais, de modo a possibilitar uma fabricação económica de peças moldadas com suficiente exatidão dimensional.

Os conjuntos de propriedades dos plásticos e dos metais são completamente diferentes, devido à estrutura especial dos plásticos e às opções de modificação do seu material. Por conseguinte, as propriedades dos plásticos relevantes para a exatidão dimensional, na aplicação das peças moldadas e durante o seu processamento por meio do método de moldação original (moldação por injeção, moldação por compressão, moldação por rotação), requerem uma avaliação e quantificação muito diferentes das tolerâncias geométricas, em comparação com os materiais metálicos. Logo, as normas de tolerâncias aplicáveis às peças metálicas não podem ser adotadas para as estruturas dos plásticos ou podem sê-lo apenas a uma escala muito limitada.

A norma DIN 16742 aplica-se na definição de tolerâncias de fabricação aceitáveis para peças moldadas em plástico. Em termos de tolerâncias dimensionais, engloba a especificação de dimensões limites para tamanhos (dimensões entre dois pontos) através de toleranciamento indireto (**tolerâncias gerais**) e de toleranciamento direto (inscrição individual dos desvios após o respetivo tamanho nominal). Relativamente ao toleranciamento dos desvios de forma e de localização, **as tolerâncias geométricas de perfil funcionam como tolerâncias gerais** e as tolerâncias geométricas de localização empregam-se no toleranciamento direto por meio de zonas de tolerância cilíndricas.

A base procedimental desta norma são os métodos de moldação originais com ferramentas fechadas (moldes), tais como a moldação por injeção (*“injection moulding”*), a moldação por injeção e compressão (*“injection compression moulding”*), a moldação por transferência (*“transfer moulding”*) e a moldação por compressão de peças moldadas não porosas feitas em termoplásticos (*“compression moulding of non-porous moulded parts made from thermoplastics”*), elastómeros termoplásticos (*“thermoplastic elastomers”*) e termoendurecíveis (*“thermosets”*), bem como a moldação por rotação de termoplásticos (*“rotational moulding of thermoplastics”*). Esta norma pode também ser aplicada a variantes de processos especiais, se tal for acordado com o fabricante da peça moldada.

Peças moldadas porosas (por exemplo, plásticos celulares) assim como outros métodos de moldação e processamento caem fora do campo de aplicação desta norma. O mesmo sucede a combinações de processos a partir dos métodos de moldação e conformação originais (por exemplo, moldação por

injeção e conformação por sopro). Para os materiais de moldação porosos, as tolerâncias admissíveis devem estar sujeitas a acordo entre as partes.

Desvios de qualidade da superfície da peça moldada, tais como marcas de rechupes (“sinks”), estruturas de escoamento indesejáveis e rugosidade e ainda linhas de junta, não são objeto desta norma.

### 9.6.2.2 Toleranciamento de peças moldadas em plástico

Quando se utiliza a norma DIN 16742, o princípio de independência (ISO 8015) aplica-se por omissão. Alterações a este princípio (por exemplo, a especificação do requisito de envolvente – tamanho ISO 14405 (E)) devem ser acordadas entre as partes contratantes.

Os desenhos de peças moldadas ou os registos de dados de CAD correspondem à geometria nominal. As tolerâncias têm desvios simétricos em relação à geometria nominal. Tamanhos com tolerâncias assimétricas (por exemplo, em dimensões de elementos para ajustamentos) devem ser convertidos em tamanhos com tolerâncias simétricas, como por exemplo: 100 0/-0,6 → 99,7 ±0,3.

O procedimento de verificação deve ser definido inequivocamente. Em particular, no caso de peças não estáveis em termos dimensionais, o conceito de medição é de particular importância [orientação funcional, sistema de referência e sobredeterminação (“overdetermination”), influência da gravidade, pré-tensão, etc.], sendo também abordado na norma ISO 10579 relativa à especificação de peças não rígidas.

No domínio dos plásticos, de acordo com a ISO 291, as condições ambientais de referência são as seguintes:

- temperatura normal de referência 23 °C ±2 K;
- humidade relativa do ar 50 % ±10 %.

Estas condições devem ser especificadas através da indicação da seguinte informação, no interior ou junto da legenda do desenho: Toleranciamento ISO 8015 (AD) – ISO 291:2008.

O grau de exatidão requerido para a produção de uma dada peça moldada é definido através da especificação de um dos nove grupos de tolerância (TG 1 a TG 9) previstos na DIN 16742. A seleção do grupo de tolerância (TG) é realizada através de um processo que recorre a uma avaliação, por pontos, de cinco fatores de influência individuais, cujo valor do somatório da pontuação ( $P_g = \sum P_i$ ) fornece o número do grupo, de acordo com o quadro 9.23.

Quadro 9.23 – Valor da pontuação correspondente aos grupos de tolerância (DIN 16742)

TG	TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6	TG7	TG8	TG9
$P_g$	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Resumidamente, as influências a considerar e as correspondentes pontuações são as seguintes:

- processo de produção (com  $P_1 = 1$  ou  $2$ );
- rigidez ou dureza do material moldado (com  $P_2 = 1$  até  $4$ );
- (valor calculado da) contração de moldação (com  $P_3 = 0$  até  $3$ );
- consideração das diferenças de contração devidas à geometria e ao processo (com  $P_4 = 1$  até  $3$ );
- avaliação do custo de produção (quatro séries de produção, com  $P_5 = 0$  até  $-3$ );

Após a determinação do somatório de  $P_1$  a  $P_4$ , dever-se-á verificar se a tolerância requerida do ponto de vista estrutural pode ser atingida tecnologicamente com a **série 1 (produção normal,  $P_5 = 0$ )** ou se será necessária a consideração da série 2 (produção exata,  $P_5 = -1$ ). A série 3 (produção de precisão,  $P_5 = -2$ ) e a série 4 (produção especial de precisão,  $P_5 = -3$ ) são sempre sujeitas a um acordo obrigatório entre as partes. As séries produtivas de maior nível de exatidão apresentam custos superiores mas permitem atingir graus de tolerância de melhor qualidade. Na norma DIN 16742, pode encontrar-se um tratamento desenvolvido deste processo. Com **tolerâncias gerais**, utiliza-se apenas a **série 1 (produção normal)**.

Em função da carga derivada da pressão de injeção, registam-se diferentes deformações e desvios de posição dos componentes da ferramenta (molde), ao fazer-se a distinção entre dimensões da peça moldada específicas da ferramenta (W) e não específicas da ferramenta (NW), visto que o tipo de fecho do contorno da ferramenta dá origem a diferentes graus de exatidão. As dimensões específicas da ferramenta são dimensões no mesmo componente da ferramenta, enquanto as dimensões não específicas da ferramenta derivam da interação de diferentes componentes da ferramenta e, por isso, tendem a dar origem a maiores distribuições dimensionais (ver exemplos nas figuras 9.44).

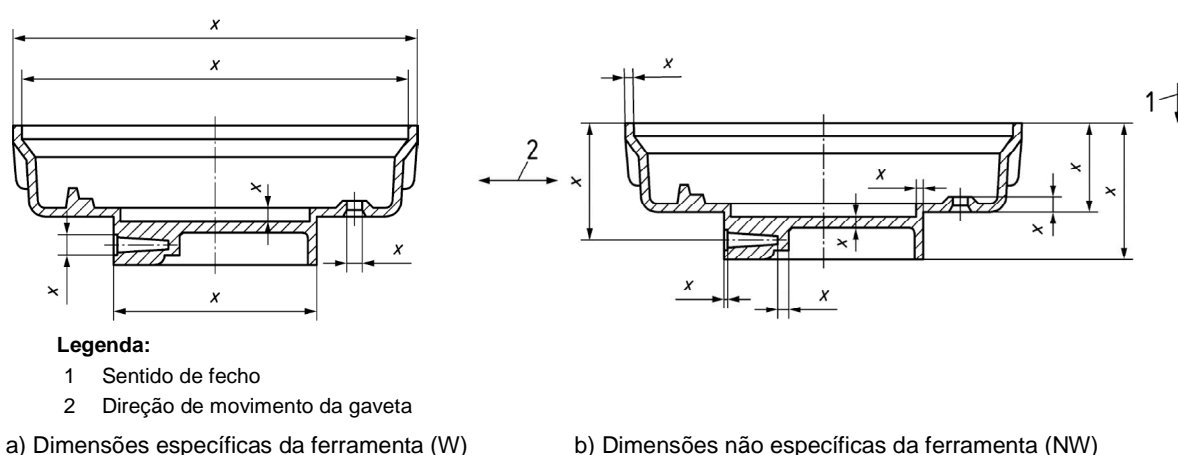


Figura 9.44 – Exemplos de diferentes tipos de dimensões de uma peça moldada. Adaptada da norma DIN 16742

Com vista a adaptar, de modo aproximado, a distribuição das tolerâncias produtivas para peças moldadas em plástico, resultantes do composto e do processo de moldação e da sua relação particular com as dimensões nominais, com o sistema ISO de tolerâncias e ajustamentos (ISO 286-1),

a norma DIN 16742 faz corresponder os nove grupos de tolerância (**TG 1** a **TG 9**) com os graus de tolerância ISO (IT), em quatro intervalos de dimensões nominais, para as dimensões específicas da ferramenta (W), de acordo com o quadro 9.24.

Quadro 9.24 – Grupos de tolerância (TG) com os graus de tolerância normalizados (IT) em conformidade com a ISO 286-1 (DIN 16742)

Dimensão nominal [mm]	Graus de tolerância normalizados ISO (IT) para dimensões específicas da ferramenta								
	TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6	TG7	TG8	TG9
1 a 6	8	9	10	11	12	13	14	15	16
> 6 a 120	9	10	11	12	13	14	15	16	17
> 120 a 500	–	11	12	13	14	15	16	17	18
> 500 a 1000	–	–	13	14	15	16	17	18	NN
Por regra, para dimensões inferiores a 1 mm e superiores a 1000 mm, as tolerâncias estão sujeitas a um acordo obrigatório entre as partes.									

As tolerâncias têm desvios simétricos em relação à geometria nominal. Os desvios limites admissíveis para peças moldadas em plástico, a utilizar em aplicações práticas, estão indicados na DIN 16742. Aí, verifica-se que os valores das tolerâncias das dimensões não específicas da ferramenta (NW) são superiores aos indicados para as dimensões específicas da ferramenta (W). Para um dado intervalo de tamanhos nominais, o valor da tolerância para as dimensões (NW) corresponde ao valor da tolerância para as dimensões (W) relativo ao intervalo de tamanhos nominais seguinte. Em termos de **tolerâncias gerais**, utilizam-se apenas os valores das tolerâncias para as dimensões não específicas da ferramenta (NW).

Por sua vez, qualquer **toleranciamento geométrico** de forma e de posição deve ser acordado entre o cliente e o fornecedor das peças moldadas, estabelecendo-se um sistema de referências especificadas, em conformidade com a ISO 5459, necessário para a especificação de tolerâncias geométricas do perfil de uma linha ou de uma superfície e de localização.

Um componente pode ter um ou mais sistemas de referências especificadas. A distância extrema ( $D_p$ ) do elemento toleranciado à origem do sistema de referências, relacionado com a tolerância de localização, deve ser utilizada para determinar o valor dessa tolerância de localização (ver figura 9.45).

Este sistema não tem de corresponder ao sistema de coordenadas do componente ou do conjunto. A dimensão  $D_p$  é a dimensão nominal utilizada na determinação do valor de uma tolerância individual de localização, em conformidade com a DIN 16742, aplicando-se também na especificação de tolerâncias geométricas de perfil de uma forma, em conformidade com o quadro 9.25.

Quadro 9.25 – Tolerâncias gerais do perfil de superfícies (DIN 16742)

$D_p$ dimensão nominal	Dimensões em milímetros				
	$\leq 30$	> 30 a 100	> 100 a 250	> 250 a 400	> 400 a 1000
Valor da tolerância $t$	0,5	1	2	4	6



Os valores empíricos de tolerância  $t$ , do quadro 9.25, em função da dimensão nominal  $D_p$ , devem ser utilizados para **tolerâncias gerais de perfil de uma superfície**.

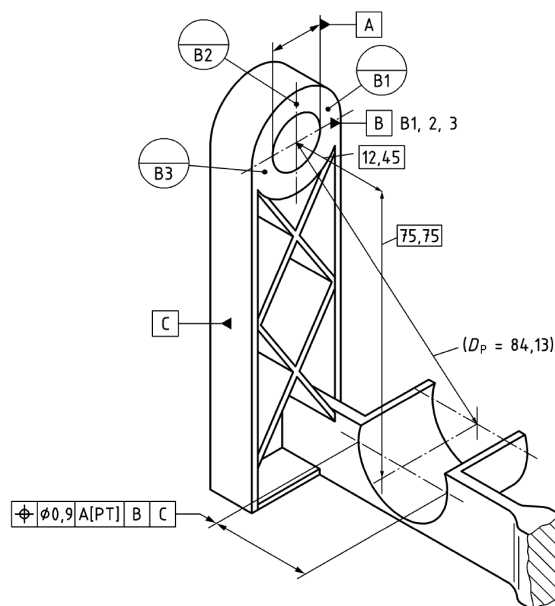


Figura 9.45 – Exemplo esquemático da determinação da dimensão  $D_p$ . Adaptada da norma DIN 16742

Os ângulos e as arestas não toleranciados diretamente não são considerados em termos de verificação.

### 9.6.2.3 Indicação nos desenhos

Para especificar tolerâncias gerais, em conformidade com a norma DIN 16742, deve indicar-se a seguinte informação, no interior ou junto da legenda do desenho:

- Tolerâncias gerais DIN 16742;
- o grupo de tolerância TG.

Exemplo: **Tolerâncias gerais DIN 16742 – TG6**

## 9.7 Critério de aceitação

De acordo com a generalidade dos documentos normativos neste domínio, salvo indicação em contrário, as peças que excedam as tolerâncias dimensionais e/ou geométricas gerais não devem ser automaticamente rejeitadas, desde que a aptidão da peça para a função não seja alterada.

No entanto, a ultrapassagem das tolerâncias gerais deverá levar à tomada de medidas que permitam corrigir essa não conformidade (se essas ocorrências se tornarem frequentes), quer através da aceitação de uma exatidão ofical corrente de qualidade inferior, quer corrigindo o processo produtivo ou ainda mudando de fornecedor, [T2].

As características geométricas abarcadas pelo conceito de “tolerâncias gerais” não são sujeitas a qualquer verificação sistemática, ao longo do processo produtivo. Apenas em situações particulares, tais como, por exemplo, na fase inicial do processo produtivo, na substituição de máquinas ou de ferramentas, na mudança de fornecedores de materiais ou de semiprodutos ou, ainda, em casos de litígio, se procederá à sua verificação com base nas regras de decisão, por omissão, indicadas na norma ISO 14253-1 ou então previamente acordadas entre cliente e fornecedor.

Os valores medidos não podem ser determinados sem um certo grau de incerteza de medição. O intervalo de incerteza corresponde a um espaço em torno do resultado de medição  $y$  que contém o valor verdadeiro desconhecido, com uma certa certeza estatística.

Na fase de concepção ou de especificação, por exemplo num desenho de engenharia com indicação de tolerâncias, os termos “em especificação” e “fora de especificação” designam zonas bem delimitadas pelas linhas limites LSL e USL (ver figura 9.46).

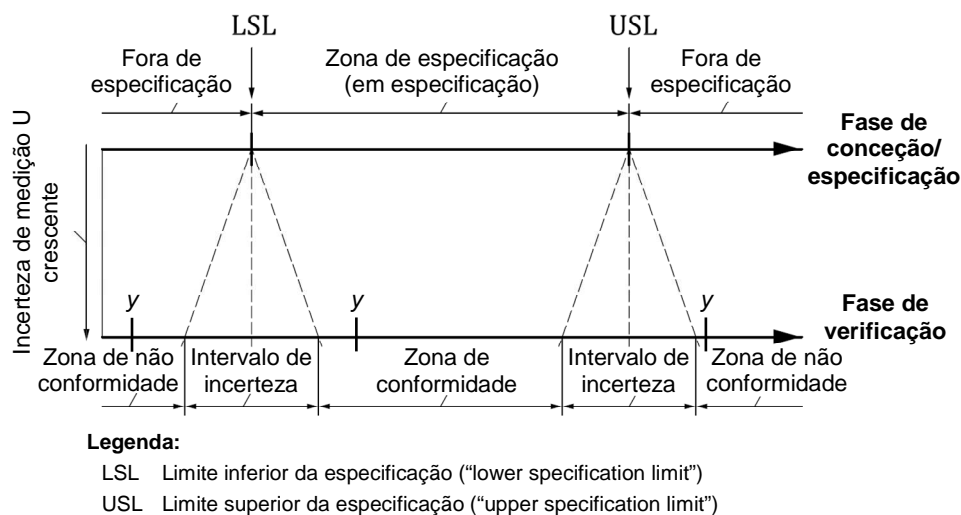


Figura 9.46 – Consequências da incerteza de medição na avaliação dos resultados de medição. Adaptada da norma ISO 14253-1

Na fase de produção ou de verificação, o significado dos termos “em especificação” e “fora de especificação” é complicado pela incerteza de medição sempre presente. Os limites nítidos (da fase de concepção) transformam-se em intervalos de incerteza. Consequentemente, as zonas de conformidade e de não conformidade ficam reduzidas pela incerteza de medição estimada, por meio do intervalo de incerteza (ver figura 9.46).

As especificações para uma peça são indicadas no pressuposto de que serão respeitadas e que, portanto, nenhuma das peças produzidas deverá estar fora da especificação. Na prática, na fase de verificação, a incerteza de medição estimada deve ser tida em consideração na demonstração ou na prova da conformidade ou não conformidade com uma dada especificação.

Uma dada especificação (LSL e USL) é invariável, sendo definida pela sua indicação no desenho. A incerteza de medição (a incerteza de medição expandida,  $U$ ) é variável, sendo controlada através de vários componentes de incerteza inerentes ao processo de medição. Logo, os tamanhos das zonas de conformidade e de não conformidade são variáveis e dependem da incerteza de medição expandida,  $U$ .

O princípio por detrás das regras de decisão sobre a conformidade ou não conformidade com a especificação é o seguinte: a incerteza de medição conta sempre em desfavor da parte que fornece a prova de conformidade ou de não conformidade e que, portanto, realiza a medição (ISO 14253-1).

Assim, o fornecedor deve provar a conformidade com a especificação (tolerância especificada), demonstrando que o resultado da medição  $y$  está dentro da zona de conformidade (zona de especificação reduzida em ambos os limites pelo valor  $U$ , ver figura 9.46), utilizando a sua incerteza de medição estimada, isto é,

$$LSL + U < y < USL - U$$

Por sua vez, o cliente deve provar a não conformidade com a especificação (tolerância especificada), demonstrando que o resultado da medição  $y$  está fora da zona de tolerância de uma característica da peça aumentada em ambos os limites pela incerteza de medição expandida,  $U$ , ver figura 9.46, utilizando a sua incerteza de medição estimada, isto é,

$$y < LSL - U \text{ ou } USL + U < y$$

Devido ao facto do intervalo de incerteza ter um efeito negativo tanto para o cliente como para o fornecedor, ambos tenderão a procurar minimizar a incerteza da tarefa de medição, por meio de métodos de metrologia industrial. O anterior procedimento que não considerava a incerteza de medição no resultado da avaliação, desde que o intervalo de incerteza ( $2U$ ) fosse suficientemente pequeno (por exemplo, 1/10 a 1/5, no máximo, da tolerância) deixou de ser admissível.

A intenção da norma ISO 14253-1 é chamar a atenção dos utilizadores para a necessidade de se efetuarem medições com meios (instrumentos e dispositivos de medição) que introduzam incertezas em conformidade com as tolerâncias a verificar e que sejam adequados aos fins previstos.

Tradicionalmente, na verificação de características geométricas com tolerâncias gerais, recorre-se a instrumentos de medição correntes (paquímetros, micrómetros, comparadores, réguas, esquadros, etc.).

Atualmente, com a conceção da geometria nominal dos produtos muito baseada em modelos em CAD 3D e a utilização crescente de tolerâncias geométricas gerais (tolerâncias de perfil de uma superfície, em particular), no processo de especificação geométrica dos produtos, recorre-se também a máquinas de medição de coordenadas ou a braços articulados, utilizando técnicas de medição com ou sem contacto, para efetuar a verificação deste tipo de especificações geométricas.

## 9.8 Considerações finais

A introdução do conceito de “**tolerâncias gerais**” permitiu tornar o desenho num documento definitivo, sem haver a necessidade de o sobrecarregar com um número excessivo de especificações individuais pouco relevantes.

Na década de oitenta do século passado, com adoção do princípio de independência como princípio fundamental de toleranciamento, em que cada requisito dimensional e geométrico passou a dever ser indicado e respeitado de modo independente, salvo qualquer indicação em contrário, este conceito teve de ser alargado às tolerâncias geométricas gerais, de modo a permitir manter a legibilidade e a facilidade de interpretação dos desenhos.

As vantagens da utilização deste conceito só são plenamente atingidas quando existe uma confiança suficiente, entre as partes contratantes, de que as tolerâncias dimensionais e geométricas gerais serão respeitadas, ao longo do processo produtivo, sem a necessidade de quaisquer cuidados especiais, isto é quando a exatidão de construção corrente, da unidade de produção em questão, é igual ou superior à das tolerâncias gerais indicadas no desenho.

Com o desenvolvimento da nova linguagem GPS, as edições mais recentes das normas sobre “tolerâncias gerais” tendem a restringir a utilização das tolerâncias dimensionais apenas às dimensões “tamanhos”, de modo a evitar as ambiguidades de especificação identificadas na ISO 14405-2, recorrendo, em alternativa, ao uso de tolerâncias geométricas gerais, em particular de tolerâncias de perfil de uma superfície, para a especificação da generalidade das restantes características geométricas das peças.

Finalmente, a generalização, a nível industrial, da conceção da geometria nominal dos produtos baseada em modelos em CAD 3D, em que as dimensões nominais nem sempre estão visíveis no modelo ou em que as suas superfícies são “*splines*” ou foram definidas apenas em termos matemáticos, inviabiliza o recurso alargado a tolerâncias dimensionais gerais, reforçando a necessidade da utilização de tolerâncias geométricas gerais de perfil de uma superfície.

## 9.9 Referências

- [B1] – BARSOU, Z. – *Design of welded joints* [Em linha]. International Welded Structures Designer – IWSD program, Module 4. Sweden, 2012, 60 p. [Consult. 2 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.weldonsweden.se/userfiles/file/IWSD2012/IWSD2012-M4/IWSD%202012-M4\\_1%20Categories%20of%20welded%20joints.pdf](http://www.weldonsweden.se/userfiles/file/IWSD2012/IWSD2012-M4/IWSD%202012-M4_1%20Categories%20of%20welded%20joints.pdf)>.
- [C1] – CHEVALIER, A. – *Guide du dessinateur industriel*. Paris: Hachette Technique, 2004.

- [E1] – ENERGINET.DK – *Offshore Substation. Materials and Fabrication of Steel for Topside and Sub-structure* [Em linha]. Document nº 44974-09, case 10/4054 – ETS-21 v. 2. Denmark, 2012, 40 p. [Consult. 2 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Engelske%20dokumenter/Om%20os/44974-09\\_ET%20-%2021%20Materials%20and%20Fabrication%20Topside%20Structures.PDF](https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Engelske%20dokumenter/Om%20os/44974-09_ET%20-%2021%20Materials%20and%20Fabrication%20Topside%20Structures.PDF)>.
- [F1] – FELDHUSEN, J. – *Exercise “Sheet Metal Design”*. Systematic Engineering Design I. Chair and Institute for Engineering Design. Ikt RWTH Aachen. Germany, 2008, 8 p.
- [H1] – HENZOLD, G. – *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. 2ª ed. U.K.: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [H2] – HENZOLD, G. – *Allgemeintoleranzen für Gußstücke* [Em linha]. In *DIN-TAGUNG: GPS 2014 – ISO-GPS-Normen zur Spezifikation und Verifikation von Funktinsanforderungen – Technische Produktdokumente*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014, 271 p. [Consult. 2 ag. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.beuth.de/sixcms\\_upload/media/2247/Tagung\\_sunterlage-GPS-2014.pdf](http://www.beuth.de/sixcms_upload/media/2247/Tagung_sunterlage-GPS-2014.pdf)>.
- [J1] – JAIN, P. L. – *Principles of Foundry Technology*. 5ª ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2009.
- [M1] – MMN 332 – *General Manufacturing Specifications. Manufacturing and Assembly Specifications* [Em linha]. MTU Friedrichshafen GmbH. Germany, 2012, 19 p. [Consult. 2 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/downloads/555-MMN332.pdf>>.
- [Q1] – QUATREMER, R.; TROTIGNON, J.-P. – *Construção Mecânica -1 Desenho, Concepção e Normalização*. Lisboa: Plátano Editora SARL, 1983.
- [S1] – SCHNEIDER, F. – *Tolérancement Géométrique: Interprétation* [Em linha]. IUFM de Lorraine. Metz: Université de Metz. 2005. 106 p. [Consult. 15 jan. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.ac-nancy-metz.fr/enseigner/sti/genimeca/zip/GPS/tol%20E9rancement%2004-05.pdf>>.
- [S2] – Science Maison – *Soudage – Partie 1* [Em linha]. Technologies industrielles. 2014. 19 p. [Consult. 1 mar. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.zpag.net/TecnologiesIndustrielles/soudage\\_partie\\_1.htm](http://www.zpag.net/TecnologiesIndustrielles/soudage_partie_1.htm)>.
- [S3] – Science Maison – *Soudage – Partie 2* [Em linha]. Technologies industrielles. 2014. 16 p. [Consult. 1 mar. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.zpag.net/TecnologiesIndustrielles/soudage\\_partie\\_2.htm](http://www.zpag.net/TecnologiesIndustrielles/soudage_partie_2.htm)>.
- [S4] – SIMÕES MORAIS, J. M. – *Desenho Técnico Básico-3*. 24ª ed. Porto: Porto Editora Lda, 2007.
- [S5] – SNV-VSM – *Extrait de Normes pour écoles et professions de la mécanique*. 9ª ed. Zurich: VSM, 2006.
- [S6] – SteelConstruction.info – *Accuracy of steel fabrication* [Em linha]. The free encyclopedia for UK steel construction information. BCSA TATA Steel SCI Steel Knowledge. UK, 2014. 13 p. [Consult. 1 mar. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.steelconstruction.info/Accuracy\\_of\\_steel\\_fabrication](http://www.steelconstruction.info/Accuracy_of_steel_fabrication)>.
- [S7] – STEFFEN, A. – *Guideline for Vendors as Part of Order Placement. Manufacturing of Individual Parts and Creation of Assemblies* [Em linha]. ThyssenKrupp System Engineering. Guideline RLAAAA002\_en. Bremen. Germany, 2013. 45 p. [Consult. 3 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.thyssenkrupp-systemengineering.com/html/img/pool/1\\_RLAAAA002\\_en\\_Druckversion.pdf](http://www.thyssenkrupp-systemengineering.com/html/img/pool/1_RLAAAA002_en_Druckversion.pdf)>.

- [T1] – TAMRE, M. – *Tolerances of angles and Cones*. In HUMIENNY, Z. [et al.] – *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House, 2001, cap. 14. ISBN 83-912190-8-9.
- [T2] – TAMRE, M. – *General tolerances*. In HUMIENNY, Z. [et al.] – *Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities*. Warsaw: Warsaw University of Technology Printing House, 2001, cap. 15. ISBN 83-912190-8-9.

### 9.9.1 Normalização

- ANSI/ASME B4.3:1978 (R2004) – General Tolerances for Metric Dimensioned Products. ASME.
- Bosch-Norm 4497026418:2013 – Drawing sheets – Supplementary fields. Series N12A Drawing regulations D11/3. BOSCH.
- DIN 6930-2:2011 – Stamped steel parts – Part 2: General tolerances. DIN.
- DIN 6935:2011 – Cold bending of flat rolled steel. DIN.
- DIN 7168:1991 – General tolerances for linear and angular dimensions and geometrical tolerances (not to be used for new designs). DIN.
- DIN 7168-1:1981 – General tolerances – Linear and angular dimensions. DIN (anulada em 1991).
- DIN 7168-2:1986 – General tolerances – Form and position. DIN (anulada em 1991).
- DIN 7168-2 suplemento 1:1979 – Tolerancias generales (tolerancias de medida libre) – Forma y posición – Protocolo de mediciones para diferencias de rectitud usuales en los talleres. DIN.
- DIN 16742:2013 – Plastics moulded parts – Tolerances and acceptance conditions; Text in German and English. DIN.
- DIN 30630:2008 – Technical drawings – General tolerances in mechanical engineering – Tolerance rule and general plan. DIN.
- EN 1090-2:2008+A1:2011 – Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures. CEN.
- ISO 286-1:2010+Cor.1:2013 – Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. ISO.
- ISO 291:2008 – Plastics – Standard atmospheres for conditioning and testing. ISO.
- ISO 1101:2012+Cor.1:2013 – Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.
- ISO 1302:2002 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation. ISO.
- ISO 2768-1:1989 – General tolerances – Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications. ISO.
- ISO 2768-2:1989 – General tolerances – Part 2: Geometrical tolerances for features without individual tolerance indications. ISO.
- ISO 2768:1973 – Permissible machining variations in dimensions without tolerance indication. ISO (anulada em 1989).
- ISO 5459:2011 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum systems. ISO.
- ISO 8015: 2011 – Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals – Concepts, principles and rules. ISO.

ISO 8015:1985	– Technical drawings – Fundamental tolerancing principle. ISO (anulada em 2011).
ISO 8062-1:2007	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts – Part 1: Vocabulary. ISO.
ISO/TS 8062-2:2013	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts – Part 2: Rules. ISO.
ISO 8062-3:2007	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts – Part 3: General dimensional and geometrical tolerances and machining allowances for castings. ISO.
ISO/DIS 8062-4.2:2015	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts – Part 4: General tolerances for castings using profile tolerancing in a general datum system. ISO.
ISO 8062:1994	– Castings – System of dimensional tolerances and machine allowances. ISO (anulada em 2013).
ISO 10135:2007	– Geometrical product specifications (GPS) – Drawing indications for moulded parts in technical product documentation (TPD). ISO.
ISO 10579:2010	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensioning and tolerancing – Non-rigid parts. ISO.
ISO 13920:1996	– Welding – General tolerances for welded constructions - Dimensions for lengths and angles – Shape and position. ISO.
ISO 14253-1:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications. ISO.
ISO 14405-1:2016	– Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 1: Linear sizes. ISO.
ISO 14405-2:2011	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Dimensions other than linear sizes. ISO.
ISO 14638:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Matrix model. ISO.
ISO/TR 14638:1995	– Geometrical product specification (GPS) – Masterplan. ISO (anulada em 2015).
NF E 02-350:1977	– Tolérances générales – Tolérances pour dimensions linéaires et angulaires non affectées de tolérances individuelles. AFNOR.
NP 265:1962	– Cotas não toleranciadas – Diferenças para peças metálicas trabalhadas por arranque de apara. IPQ (anulada em 1993).





## **CAPÍTULO 10**

**Indicações dos estados de superfície**



## Capítulo 10

### Indicações dos estados de superfície

#### 10.1 Introdução

As superfícies dos diferentes componentes de um mecanismo devem ter características adequadas ao tipo de funções por eles desenvolvidas. A importância do estudo dos acabamentos de superfície aumenta à medida que crescem as exigências do projeto. Os diferentes processos de fabricação de componentes mecânicos determinam acabamentos diversos nas suas superfícies. Estas, por mais perfeitas que sejam, apresentam irregularidades que podem ser classificadas em: desvios macrogeométricos (desvios de retitude, de planeza, ondulação, etc.) e desvios microgeométricos (rugosidade).

A norma ISO 8785 define **estado de superfície** como sendo o resultado de desvios repetitivos ou aleatórios, em relação à superfície geométrica, que formam a topografia tridimensional de uma superfície. O estado de superfície compreende a rugosidade, a ondulação, a orientação das irregularidades, as imperfeições e os desvios de forma, numa zona limitada da superfície. Os desvios de forma são tratados no âmbito do toleranciamento geométrico (norma ISO 1101). Na figura 10.1, apresenta-se um esquema das diferentes características componentes do estado de superfície.

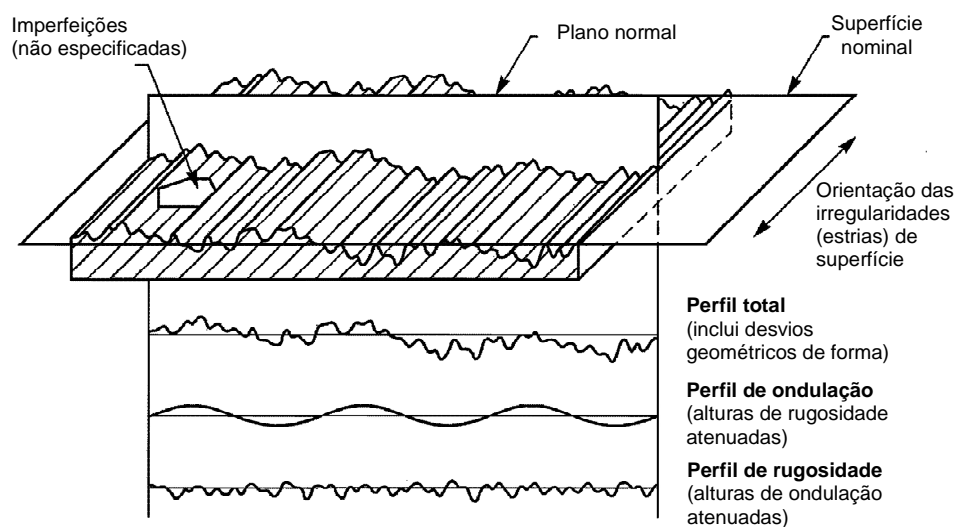


Figura 10.1 – Esquema de características de superfície (ASME B46.1-2009)

Neste contexto, as superfícies podem ser abordadas com base em dois aspetos distintos mas que são complementares. Por um lado, através da consideração do seu papel importante para a

funcionalidade dos mecanismos, nomeadamente estudando os aspetos tribológicos do seu comportamento relacionados com o atrito, a lubrificação, o desgaste, etc. e, por outro, recorrendo à sua utilização para o controlo e avaliação do desempenho dos processos de fabricação [W2].

Os desvios de forma numa peça podem ser causados, por exemplo, pelo desalinhamento do eixo da peça em relação ao sistema de guiamento da ferramenta de corte. A ondulação numa superfície da peça pode ser derivada de desvios de retitude dos guiamentos e da vibração da máquina-ferramenta. Por sua vez, a rugosidade é um resultado direto, por exemplo, da escolha dos avanços da ferramenta, das velocidades de corte e da geometria da ferramenta.

O estado de superfície é uma impressão digital do processo produtivo. O seu controlo aumenta o conhecimento do processo e, por conseguinte, permite a sua alteração, se necessária [M4]. Os métodos de medição dos estados de superfície podem ser classificados, genericamente, em métodos com contacto ou métodos sem contacto e em métodos bidimensionais (métodos do perfil) ou métodos tridimensionais [de superfície; “*areal*” (en) ou “*surfacique*” (fr)].

Presentemente, o método de medição dos estados de superfície mais utilizado é a exploração do perfil de superfície, ampliado e com anamorfose (a ampliação vertical é maior do que a ampliação horizontal), num plano normal à superfície considerada, dando origem a uma determinada relação de apresentação (“*aspect ratio*”). Na figura 10.2, pode observar-se a representação do perfil de um estado de superfície com duas relações de apresentação diferentes.

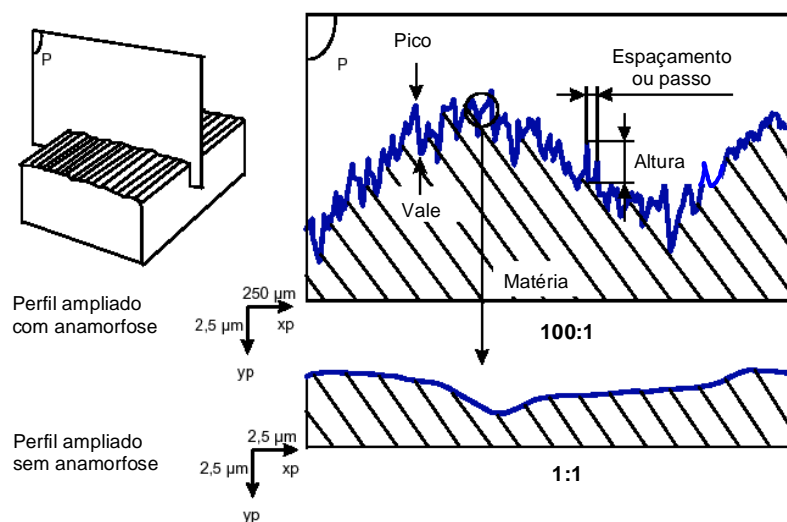


Figura 10.2 – Representação das irregularidades num perfil do estado de superfície (CNOMO GE40-084N)

Este perfil de superfície apresenta uma sucessão de picos separados por vales. Os picos e os vales constituem as irregularidades geométricas do perfil. Estas irregularidades são quantificadas pela sua altura e pelo seu espaçamento. Quando esse espaçamento é regular designa-se por passo. À partida, não existe uma definição absoluta do que é uma rugosidade e sobre quando uma rugosidade passa a ser considerada uma ondulação. O ponto em que se altera o conceito é arbitrário e está

relacionado com o processo de fabricação e com a função da superfície [M4]. No entanto, as diferentes ordens de grandeza destas irregularidades podem ser definidas através da relação entre o passo e a altura de um elemento do perfil (DIN 4760) ou a partir do valor do seu passo (CNOMO GE40-084N). No quadro 10.1, apresenta-se um sistema de classificação de desvios de superfície estabelecido com base nestes critérios e dão-se alguns exemplos destes tipos de desvios.

Quadro 10.1 – Sistema de classificação de desvios (irregularidades) de superfície

Desvio Geométrico Esquema de perfil	Exemplos do Tipo de Desvio
<b>1ª ordem: Desvios de forma</b> 	<b>Desvios de forma:</b> Desvios de retitude, planeza, circularidade, cilindridade, etc. A razão entre a extensão dos desvios de forma locais e o seu valor é em geral superior a 1000:1 [H3].
<b>2ª ordem: Ondulação</b> 	<b>Ondulações:</b> Irregularidades geométricas mais ou menos periódicas. Em geral, a razão entre o passo e a altura do perfil situa-se entre 1000:1 e 100:1. O passo entre dois dos seus topos pode estar, p. ex., compreendido entre 500 a 2500 μm*.
<b>3ª ordem: Rugosidade</b> 	<b>Rugosidade:</b> Irregularidades geométricas periódicas ou não periódicas. Em geral, a razão entre o passo e a altura do perfil situa-se entre 100:1 e 5:1. O passo entre dois dos seus picos pode estar, p. ex., compreendido entre 0 e 500 μm*.
<b>4ª ordem: Rugosidade</b> 	<b>Arrancamentos:</b> Marcas de ferramenta, fendas, picagens, estrias de gripagem, escamas, protuberâncias.
<b>5ª ordem: Rugosidade</b> Não representável	Estrutura cristalina
<b>6ª ordem: Rugosidade</b> Não representável	Estrutura da malha cristalina do material
<b>Sobreposição na superfície real</b> (os desvios de superfície de 1ª a 4ª ordem são geralmente sobreponíveis). 	

\* Limites utilizados na indústria automóvel [B3].

No quadro 10.2, apresentam-se alguns exemplos da influência dos diferentes desvios geométricos na funcionalidade das superfícies bem como as possíveis origens desses desvios, resultantes dos processos de fabricação utilizados (CNOMO GE40-084N). As referências [G1, W2, W3] e a norma ISO 25178-6 (ver também figura 10.14) fornecem indicações sobre os meios de medição clássicos passíveis de serem utilizados na avaliação destes desvios.

Quadro 10.2 – Os desvios (irregularidades) de superfície: sua importância funcional e origens

Desvio geométrico Nº de ordem	Superfície especificada	Origens dos desvios resultantes do processo de fabricação *	
	O significado dos desvios em relação à função *	Processo de trabalho Material trabalhado	Máquina Instalação
<b>1ª ordem</b>  <b>Desvio de forma</b>	<b>Influenciam:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• O atrito de escorregamento e de rolamento.</li> <li>• A resistência ao encaixe.</li> <li>• A estanquidade dinâmica e estática.</li> <li>• O resultado de medições.</li> </ul>	Deformação da peça: <ul style="list-style-type: none"> <li>• durante o trabalho, independentemente do processo;</li> <li>• após o trabalho, dependendo do material (libertação de tensões internas).</li> </ul>	Defeitos de fixação da peça e da ferramenta.  Deflexão dos elementos da máquina.  Qualidade do guiamento dos elementos deslizantes.  Desgaste dos órgãos.
<b>2ª ordem</b>  <b>Ondulação</b> (periódica)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O aspeto (pintura, facetas em peças retificadas, traços do avanço da fresa).</li> <li>• A condução térmica e elétrica.</li> </ul> <b>Criam:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desgaste.</li> <li>• Gripagem.</li> </ul> <b>Diminuem:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A duração de vida dos órgãos mecânicos.</li> <li>• etc.</li> </ul>	Fresagem (passo da ondulação: p. ex. avanço por volta da fresa, compreendido entre 0,5 e 2,5 mm).  Inclinação da fresa (frontal): <ul style="list-style-type: none"> <li>• mau afiamento,</li> <li>• má regulação dos dentes (frontal, de disco).</li> </ul> Retificação: má diamantagem da mó.	Vibrações de baixas frequências: <ul style="list-style-type: none"> <li>• da peça,</li> <li>• da ferramenta,</li> <li>• das duas,</li> </ul> devidas às deflexões, aos maus guiamento e equilíbrio dos elementos das máquinas, e, igualmente, à insuficiência da instalação do isolamento dinâmico passivo e ativo.
<b>3ª ordem</b>  <b>Rugosidade</b> (Estrias e ranhuras)  (Desvios periódicos ou pseudo-periódicos)	<b>Influenciam:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• O atrito</li> <li>• O desgaste</li> <li>• A lubrificação</li> <li>• O escoamento de fluidos.</li> <li>• A estanquidade dinâmica e estática.</li> <li>• O revestimento (pintura).</li> <li>• A aderência (colagem)</li> </ul>	Processo por arranque de apara: <b>estrias e ranhuras</b> , devidas ao avanço da aresta de corte da ferramenta; ao avanço por volta da peça ou da mó, c/ valores até 0,5 mm, etc.  Processos de conformação a frio ou a quente: <b>relevos e crateras</b> justapostos.  Geometria de afiamento da ferramenta.  Qualidade da mó.	Vibrações de altas frequências (causas análogas às acima enumeradas).  Instalação de lubrificação: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lubrificante: natureza, qualidade do lubrificante, ação de arrefecimento, estabilidade no tempo.</li> <li>• Modo de irrigação.</li> <li>• Filtro; eficácia do sistema (entre outras, frequência de limpeza).</li> </ul>
<b>4ª ordem</b>  <b>Rugosidade</b> (Arrancamentos: marcas da ferramenta, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A deposição eletrolítica.</li> <li>• As resistências aos esforços alternados.</li> <li>• etc.</li> </ul>	Qualidade de afiamento da ferramenta e da diamantagem da mó.  Heterogeneidade, plasticidade do material trabalhado (ferro fundido, alumínio com forte teor em silício).	
<b>5ª ordem</b>  <b>Rugosidade</b> (Não representável) Estrutura cristalina		Processos de cristalização, modificação da superfície através de ação química (p. ex. tratamento c/ ácido), processos de corrosão.	
<b>6ª ordem</b>  <b>Rugosidade</b> (Não representável) Estrutura da malha cristalina do material			

\* Indicações dadas a título de exemplo.

Os instrumentos de medição clássicos mais comuns são baseados em métodos de apalpação mecânica e em métodos óticos. A partir de 1929, Gustav Schmaltz deu uma primeira contribuição importante para o desenvolvimento de aparelhos baseados em ambos os métodos. Após ter visitado empresas tais como a General Motors e a Ford, onde viu técnicos dos departamentos de produção a

arranhar as superfícies das peças com a ponta da unha e, por vezes, a observar essas superfícies obliquamente com o auxílio de uma faixa de luz, de modo a poderem avaliar a sua rugosidade, teve a ideia de substituir a utilização da unha por um apalpador ("*stylus*") e o olho por técnicas de visualização óticas. Historicamente, o apalpador mecânico deu mais atenção aos detalhes verticais das superfícies. Em termos de engenharia, esta abordagem considera a função tribológica como a mais importante, em que o contacto e outros fenómenos similares são dominados pelas alturas das asperezas. Por sua vez, os métodos óticos dão mais atenção aos detalhes laterais, uma vez que a sua principal utilização é a observação da estrutura superficial que, à época, parecia ser mais relevante na metalurgia e na química. Em termos dos métodos convencionais merecem ainda referência os métodos pneumáticos e os métodos capacitivos [W2, W3]. Apesar da diversidade de métodos de medição atualmente disponíveis, até há pouco tempo, o único método normalizado de avaliação do perfil dos estados de superfície era o método de contacto por apalpação ("*stylus*") definido na norma ISO 3274:1996.

As superfícies estão a tornar-se cada vez mais importantes sobretudo com o desenvolvimento da miniaturização e com o advento dos micromecanismos. O papel da superfície é explorado em termos do controlo da fabricação e na previsão dos desempenhos ao nível das interfaces e em corpos com escorregamento. Em geometrias no intervalo dos micrometros e dos nanometros, funções tais como impermeabilidade ("*tightness*"), "molhabilidade" ("*wettability*"), atrito de escorregamento ou resistência à corrosão são dominantes, conforme ilustram os exemplos apresentados na figura 10.3. As micro e nanogeometrias são importantes, não só em componentes miniaturizados, tais como microrrodas dentadas e bombas miniatura, mas também em componentes grandes, tais como cambotas ou ferramentas de conformação, cuja função é otimizada através de estruturas especificamente adaptadas à escala micrométrica e nanométrica. [W1].

Os parâmetros de estado de superfície, em conformidade com a norma ISO 4287 (ver secção 10.5 deste texto), que antes, por vezes, tinham apenas como objetivo o controlo da duração de vida das ferramentas de corte, hoje em dia são as características de qualidade mais importantes para a descrição dos elementos de superfície não determinísticos, no intervalo dos micro e nanometros.

Em termos de métodos de medição, para além dos métodos por apalpação e óticos clássicos, há uma nova geração de métodos de varrimento por sonda (SPM – "*scanning probe methods*"), tais como, p. ex., a microscopia de varrimento por efeito túnel (STM – "*scanning tunnelling microscopy*"), que surgiu em 1981, e a microscopia de força atómica (AFM – "*atomic force microscopy*"), inventada em 1986. A STM é usada, nomeadamente, para estudar estruturas atómicas e moleculares e na medição de redes de difração superfina, discos de armazenamento, cabeças de leitura/escrita, etc., mas só pode ser aplicada na medição de superfícies condutoras. A AFM é utilizada, sobretudo, para investigar interações tribológicas, materiais orgânicos não condutores e materiais biológicos [W2, S4].

Contudo, apesar da alta resolução e de dados de medição geométrica globais, em muitos casos, não é possível fazer uma afirmação cabal sobre a capacidade funcional da topografia da peça, porque os

conceitos tradicionais de cotação e toleranciamento são apenas orientados para a geometria e os parâmetros normalizados não são suficientes para considerarem a interação com parâmetros não geométricos, tais como forças de aderência e coesão ou efeitos hidrodinâmicos, que são dominantes em funções tais como a “molhabilidade” ou o escorregamento. Nestes casos, torna-se necessário relacionar variáveis geométricas com variáveis não geométricas, o que torna a especificação e verificação geométricas mais complexas e difíceis, em termos da decisão de conformidade orientada para a função [H1, W1].

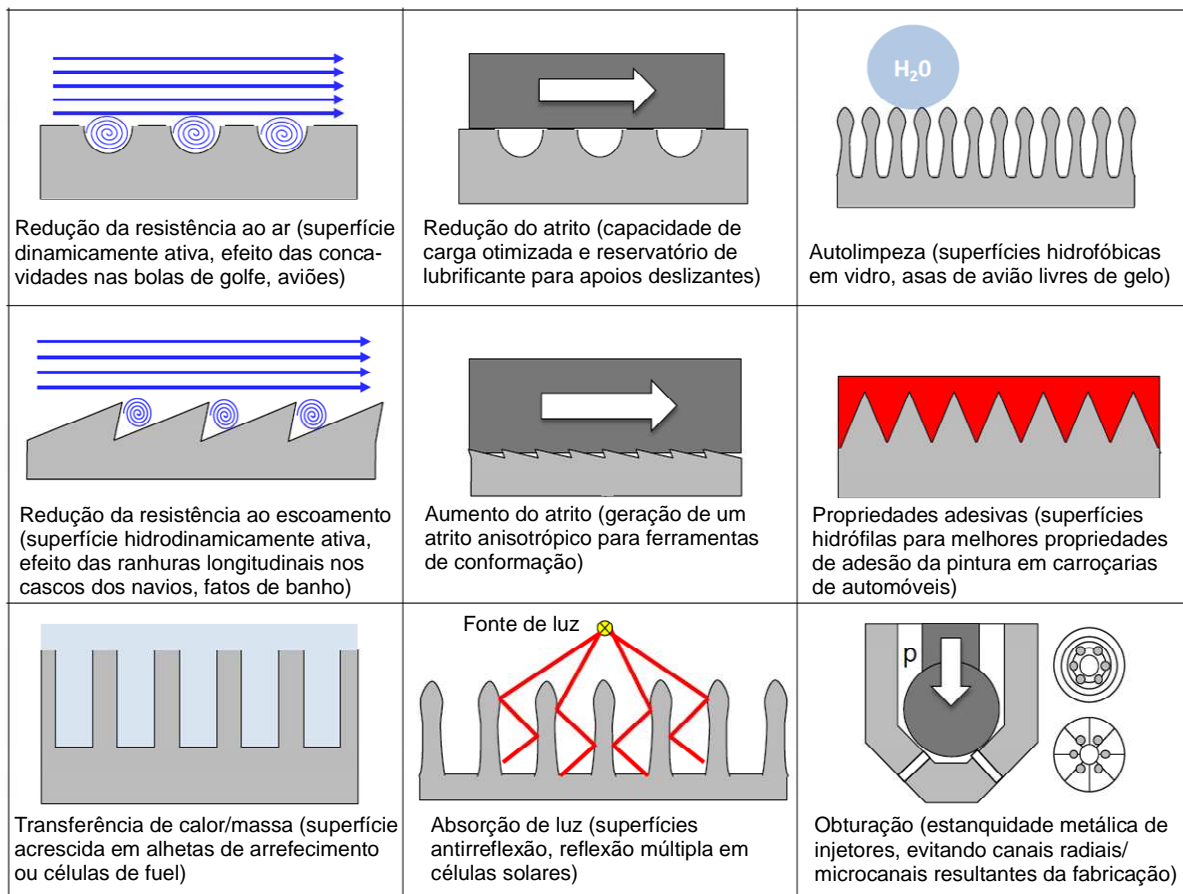


Figura 10.3 – Exemplos de funções no intervalo dos micrometros e dos nanometros. Adaptada de [W1]

A especificação simples de parâmetros caracterizadores dos estados de superfície, indicados por exemplo nas normas ISO 4287 (método do perfil) e ISO 25178-2 (métodos de superfície), não é, por si só, suficiente para caracterizar os requisitos de novas funções técnicas, tais como as anteriormente referidas, na figura 10.3, a título de exemplo. A nova linguagem de “Especificação geométrica de produtos” (GPS), ao substituir a indicação de zonas de tolerância simples por especificações geométricas definidas como um conjunto ordenado de operações (ver capítulo 4 deste texto), está a tentar elaborar uma linguagem conceptualmente muito mais rica [N1, W1].

O desenvolvimento dos métodos de medição tridimensionais (“areal”) no domínio da avaliação dos estados de superfície, registado nas últimas décadas, com o estabelecimento de novos parâmetros de superfície (“areal”), que deu origem à recente publicação de um primeiro grupo de normas da série



ISO 25178, é também um contributo positivo neste âmbito. A referência [W1], por exemplo, mostra como alguns dos parâmetros definidos na ISO 25178-2 podem ser úteis na caracterização de propriedades de microestruturas funcionais do tipo das referidas na figura 10.3.

## 10.2 Breves referências à evolução do estudo da geometria das superfícies e da sua avaliação

O estudo da influência dos **estados de superfície**, sobretudo ao nível da sua microgeometria, no desempenho funcional dos componentes de diferentes sistemas mecânicos, tem vindo a registar progressos significativos, desde a década de 20 do século passado. Por exemplo, cedo se constatou que a melhoria da qualidade das superfícies dos rolamentos de esferas, em apenas uma classe, aumentava a sua duração de vida entre 100 e 150 % [L1].

Na década de trinta, na sequência de trabalhos com vista à determinação da microgeometria das superfícies, apareceram os primeiros instrumentos que procediam a essa avaliação, através de parâmetros de perfil, tais como a primeira máquina do tipo apalpação de superfície, de Gustav Schmaltz, na Alemanha, em 1929, o microinterferómetro de Vladimir Linnik, na URSS, em 1933, e o perfilómetro de Ernst Abbott, nos USA, em 1933-1936, entre outros [W3, W4]. Na década seguinte, com o interesse crescente pela metrologia das superfícies, começaram a estar comercialmente disponíveis padrões de comparação tátil de rugosidades de superfície [P1, B4]. Com o tempo, esses padrões foram vindo alargada a sua utilização a superfícies produzidas por um conjunto diversificado de processos de fabricação, tendo sido objeto de normalização internacional na década de setenta (normas da série ISO 2632).

Com esses desenvolvimentos, começaram a surgir projetos de normas sobre a rugosidade das superfícies na maioria dos países desenvolvidos. A norma DIN 140, Partes 1 a 7, publicada em 1931, por exemplo, tratava dos símbolos caracterizadores dos estados de superfície, a indicar nos desenhos técnicos (ver figura 10.4).

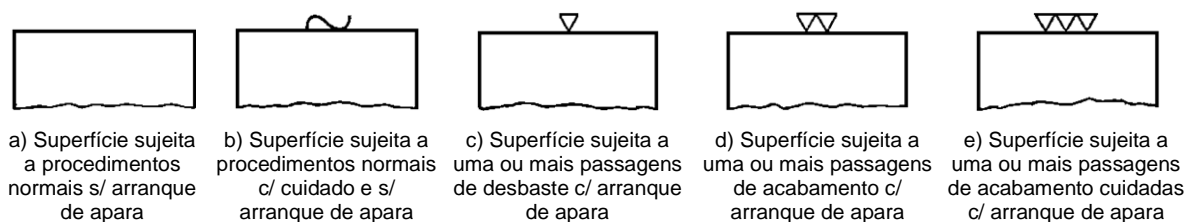


Figura 10.4 – Símbolos para a indicação dos estados de superfície em desenhos (DIN 140-2:1931)

Estes símbolos permitiam apenas uma apreciação qualitativa do estado das superfícies e, nas décadas seguintes, à medida que tal deixou de ser suficiente, a indústria passou a utilizar estes símbolos ligados a determinados valores limites superiores de parâmetros do perfil de rugosidade [O1].

Na realidade, a medição de uma superfície qualquer deveria ser tridimensional. No entanto, as dificuldades então envolvidas na realização de tais medições levaram a que as várias definições fossem consideradas num plano bidimensional onde são mais fáceis de apreender, dando origem ao designado “Método do perfil”.

Nos USA, a primeira norma sobre estados de superfície, antecessora da atual norma ASME B46.1, que trata da definição de parâmetros, classificação de instrumentos de medição, procedimentos e técnicas de medição, etc., foi editada em 1940, mas só começou a ser amplamente utilizada na década seguinte, uma vez que os instrumentos de medição por contacto, então disponíveis, danificavam mais do que avaliavam a microestrutura das superfícies em apreço [W1]. A nível internacional, os trabalhos neste domínio iniciaram-se, em 1950, com a constituição do Comité ISO/TC 57 – “*Metrology and properties of surfaces*”, tendo a recomendação ISO/R 468 – “*Surface roughness*”, sobre parâmetros, os seus valores e regras gerais para a especificação de requisitos, sido publicada em 1966 [L1]. No início da década de 60, as várias normas nacionais utilizavam dois sistemas de medição de base: o sistema M (ligado à linha média) e o sistema E (da linha envolvente) [O1].

No **sistema M**, a linha média  $L_m$  é uma linha com a forma do perfil geométrico, nos limites do comprimento de base  $l$  (“*meter cut-off*”), (ver secção 10.10.3), disposta de modo que a soma dos quadrados dos desvios do perfil, em relação a ela, seja mínima. Na prática, a linha média é determinada como sendo a linha paralela à orientação geral do perfil, para a qual as áreas abarcadas pelo perfil, acima e abaixo dessa linha, são iguais (ver figura 10.5).

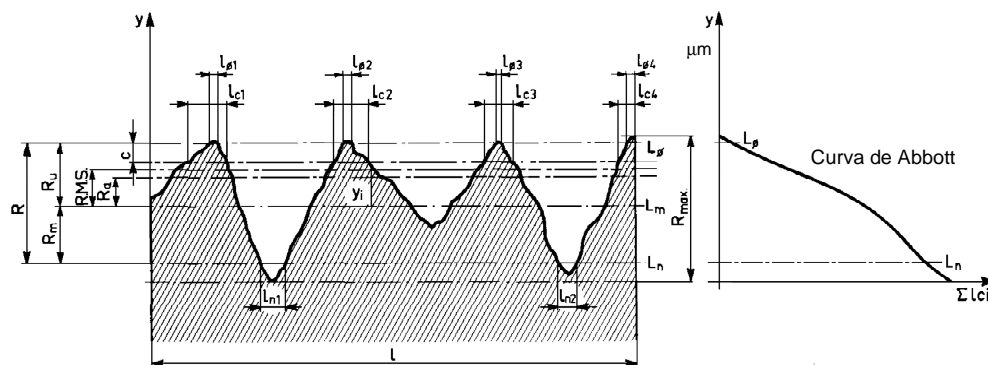


Figura 10.5 – Medidas de base de uma superfície em conformidade com o sistema M (linha média). Complementarmente, no gráfico da direita está representada a curva de Abbott. Adaptada de [O1]

Nos primórdios das medições dos estados de superfície, a informação sobre o perfil era filtrada graficamente. O perfil era dividido em segmentos de comprimento igual e, em cada segmento, era desenhada uma linha média que tinha em conta a inclinação do perfil nesse segmento. O perfil de rugosidade era então obtido através da consideração dos desvios dos pontos em relação a essas linhas médias. Como esse método gráfico de obtenção da linha média era muito demorado rapidamente se adotaram filtros elétricos para efetuar a filtragem do estado de superfície [M5].

Os filtros elétricos mais antigos utilizados na metrologia de superfícies foram os filtros analógicos do tipo RC que permitiam calcular os parâmetros estatísticos mais correntes. O circuito analógico **2RC** (constituído por resistências e condensadores) tem uma característica de transmissão com um valor de amplitude de 75 % para um comprimento de onda do perfil igual ao comprimento de onda de corte (“*cut-off wavelength*”) do filtro,  $\lambda = \lambda_c$  (ver figura 10.6).

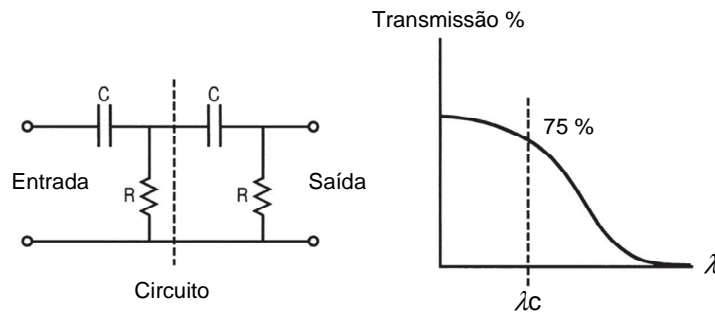


Figura 10.6 – Característica de transmissão do filtro analógico 2RC. Adaptada de [W2]

Este filtro tem uma tendência natural para introduzir uma deformação e um desfasamento, ou seja um erro, no sinal, na maioria dos perfis em que a sua forma não é sinusoidal. Na figura 10.7, pode observar-se que há um atraso da linha média, que representa a ondulação e a forma, em relação ao perfil que contém a rugosidade. Como a rugosidade resulta da diferença entre o perfil e a linha média, que representa a ondulação e a forma, alguns parâmetros de amplitude (pico e vale) do perfil poderão ficar distorcidos e, em particular, ser maiores do que o seu valor verdadeiro. Os parâmetros de valor médio das amplitudes não são afetados de todo ou significativamente. Este foi o filtro normalizado, prescrito na norma ISO 3274:1975, em vigor até 1996.

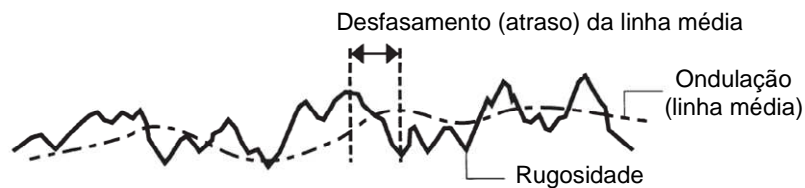


Figura 10.7 – Distorção do sinal originada pelo filtro 2RC. Adaptada de [W2]

Witthehouse and Reason (1965) ainda simularam o filtro 2RC em termos digitais, tendo ultrapassado muitas das insuficiências do filtro analógico, mas estes filtros acabaram por ser preteridos, na década de 90 do século passado, pelo filtro gaussiano, entretanto desenvolvido e que passou a ser a norma internacional na medição de perfis de superfícies (ISO 11562:1996), [C1, W2, R1, M5,].

Por outro lado, um parâmetro ou família de parâmetros que desde cedo começou a fazer o seu caminho no apoio ao estudo do comportamento tribológico das superfícies foi o associado à curva de Abbott-Firestone (ver exemplo na figura 10.5), atualmente designada de “curva da taxa do comprimento de sustentação”. Introduzida na General Motors, em 1936, esta curva foi o primeiro “parâmetro funcional”, utilizado neste domínio, com vista a fornecer uma indicação sobre a superfície

de sustentação que pode ser esperada após uma dada quantidade de rodagem ou de desgaste. Este tipo de abordagem é utilizado na indústria automóvel, em superfícies multiprocessos, tais como as superfícies “*plateau honing*” dos cilindros dos motores de combustão interna, em que a zona superior da curva caracteriza a capacidade de carga do perfil da superfície e a zona inferior a sua capacidade de retenção de lubrificante. A atual série de normas ISO 13565 aborda a curva de Abbott em termos dos processos de avaliação para a determinação dos respetivos parâmetros caracterizadores e do método de filtragem a utilizar [A1, O1, W2, W3].

Em simultâneo, com a evolução que se foi registando no filtro 2RC, von Weingraber (1957-58), na Alemanha, desenvolveu uma técnica alternativa para separar a microgeometria da forma em geral – o **sistema E (da linha envolvente)**. Como, em muitas aplicações, o estado de superfície desempenha um papel importante durante o contacto das superfícies conjugadas, von Weingraber simulou esse contacto, num perfil medido, através da determinação da envolvente de uma esfera rolando sobre uma superfície. Os desvios em relação à envolvente representariam a microgeometria (ver figura 10.8) [O1, M5].

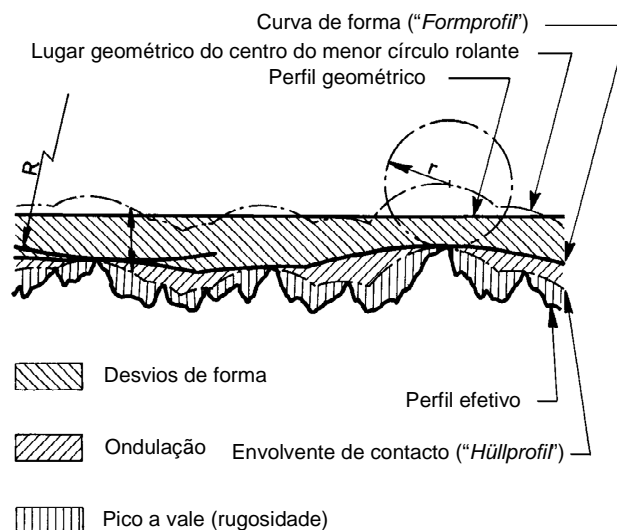


Figura 10.8 – Medidas de superfície de base em conformidade com o sistema E (da linha envolvente). Adaptada de [O1]

Este sistema é desenvolvido através de dois círculos com raios  $r$  e  $R$  que rolam sobre a superfície. Os lugares geométricos dos centros dos dois círculos são deslocados o suficiente, numa direção perpendicular ao perfil geométrico, de modo que os trajetos de cada um dos centros (o “*Formprofil*” e o “*Hüllprofil*”) toquem nos picos mais elevados do perfil efetivo. Com este procedimento, na figura 10.8, podem distinguir-se facilmente os diferentes tipos de desvios registados entre o perfil efetivo e o perfil geométrico. À época, as dificuldades sentidas na implementação deste sistema em instrumentos de medição levou ao desinteresse da sua aplicação prática [W3]. Com o tempo, o sistema M tornou-se no sistema de filtragem *de-facto* mas, recentemente, o sistema E reapareceu e ganhou algum destaque como parte de um grupo grande de técnicas de filtragem designado de filtros morfológicos [M5], ver documentos normativos da série ISO 16610-40 a -49.

Uma técnica da linha envolvente proposta mais tarde, em França, no princípio dos anos 70 do séc. XX, foi o **método dos motivos**. Os seus principais promotores foram o Prof. J. Bielle, que implementou o sistema na fábrica da Peugeot, e B. Scheffer, que o converteu à prática industrial [B3, W3]. Este método foi adotado pela indústria automóvel francesa (grupos PSA-Peugeot-Citroën e Renault), começando por ser tratado em normas e guias CNOMO (“*Comité de Normalisation des Moyens de Production*”) e estabelecido, posteriormente, na norma ISO 12085:1996. A abordagem descrita nesta norma permite determinar parâmetros de rugosidade e de ondulação a partir do perfil primário, através da procura dos motivos característicos da superfície em análise. Este método não está ligado a qualquer filtro de perfil e fornece parâmetros que são baseados na profundidade e no passo dos motivos, são complementares aos parâmetros definidos na norma ISO 4287 e podem ser utilizados para descrever as propriedades funcionais das peças.

Até ao presente, os parâmetros do perfil de rugosidade (ISO 4287), ligados à linha média, continuam a ser utilizados na maioria dos países. Na medição de perfis de superfícies, os filtros sem alteração de fase (“*phase correct filters*”) ou gaussianos, derivados da utilização de tecnologias digitais, têm a vantagem de avaliar as componentes de rugosidade e de ondulação numa só filtragem, sem introduzirem qualquer desfasamento (ver figura 10.9), podendo ser implementados com bastante facilidade.

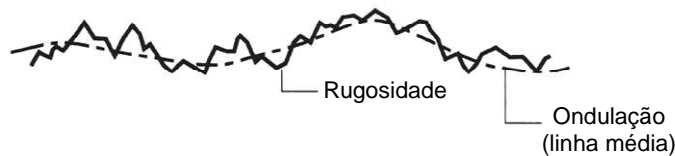


Figura 10.9 – Exemplo de filtro sem alteração de fase (“*phase correct filter*”). Adaptada de [W2]

A curva da característica de transmissão deste filtro é derivada da distribuição de Gauss. A principal vantagem dos filtros sem alteração de fase resulta de, em qualquer ponto do perfil, o valor da linha média e a rugosidade poderem ser novamente somadas aritmeticamente, de modo a reconstruir com exatidão o perfil total original. A característica deste filtro permite a transmissão de 50 % da amplitude de um perfil com um comprimento de onda igual ao comprimento de onda de corte (“*cut-off wavelength*”) do filtro,  $\lambda = \lambda_c$  (ver figura 10.10), e uma separação equilibrada da rugosidade e da ondulação.

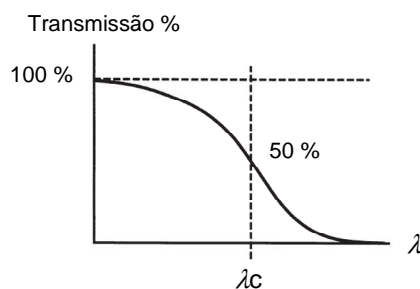


Figura 10.10 – Característica de transmissão do filtro sem alteração de fase. Adaptada de [W2]

A linha média deste filtro (ver figura 10.9) é a componente de onda longa que é determinada, para qualquer ponto do perfil, através de um valor médio pesado derivado dos pontos adjacentes. A função peso, utilizada para calcular a linha média, corresponde à equação da função densidade de probabilidade de Gauss e indica, para cada ponto, o peso atribuído pelo perfil na sua vizinhança (ver figura 10.11). Não há qualquer distorção com este tipo de filtro, em virtude deste ter uma resposta ao impulso (função peso) com um eixo de simetria.

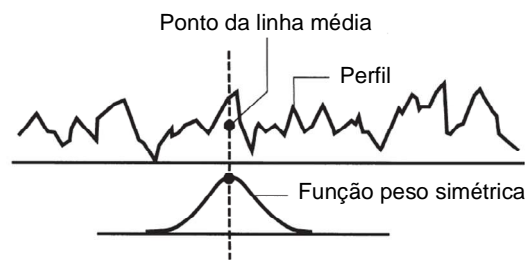


Figura 10.11 – Função peso de filtro sem alteração de fase. Adaptada de [W2]

A utilização deste filtro generalizou-se desde que passou a ser o filtro normalizado a nível internacional, através da norma ISO 11562:1996, entretanto substituída pela ISO 16610-21:2011 [C1, M5, W2].

O filtro 2RC não consegue separar a componente de rugosidade da componente de ondulação tão eficazmente como o faz o filtro gaussiano. Logo, para avaliar parâmetros de ondulação, apenas se deverá utilizar o filtro gaussiano.

Em 1961, Olsen [O1] ao fazer uma análise comparativa das várias normas nacionais sobre rugosidade de superfícies, então em vigor, constatava que havia uma tendência nas normas mais recentes para alterarem a indicação dos estados de superfície com base nos “velhos” símbolos dos triângulos (ver figura 10.4), passando antes a utilizar a um símbolo do tipo  $\sqrt{\quad}$ , como suporte de todas as indicações relativas ao estado da superfície a caracterizar, de acordo com os trabalhos então em desenvolvimento no âmbito da ISO. Em Portugal, a norma inquérito NP I-976:1969 seguiu também esta tendência, tendo adotado as recomendações ISO então em preparação.

A norma ISO 1302:2002 (4<sup>o</sup> ed.) – “*Indication of surface texture in technical product documentation*” em vigor, que estabelece as regras para a indicação dos estados de superfície em desenhos, especificações, contratos e relatórios, por meio de símbolos gráficos e de indicações textuais (ver exemplos nas figuras 10.51 a 10.57), no âmbito do conceito GPS, foi publicada pela primeira vez em 1971, sob a forma de recomendação (ISO/R 1302).

Atualmente, com a disponibilidade de instrumentos de medição e sensores cada vez mais sofisticados e de grandes capacidades de processamento de informação, através da utilização de computadores pessoais, há uma sobreposição das capacidades de medição. Um instrumento clássico com apalpador pontiagudo pode fazer a aquisição de rugosidades, ondulações e desvios de forma. Um instrumento de medição de circularidades pode também obter dados de retitude e uma

máquina de medição de coordenadas pode fazer a aquisição de informação dimensional e de forma. A figura 10.12 fornece uma visão geral sobre os instrumentos de medição correntemente disponíveis. À medida que a largura de banda dos instrumentos aumenta, torna-se essencial fazer a separação dos dados do perfil de superfície em regimes de onda significativos, antes de se efetuar a respetiva caracterização numérica.

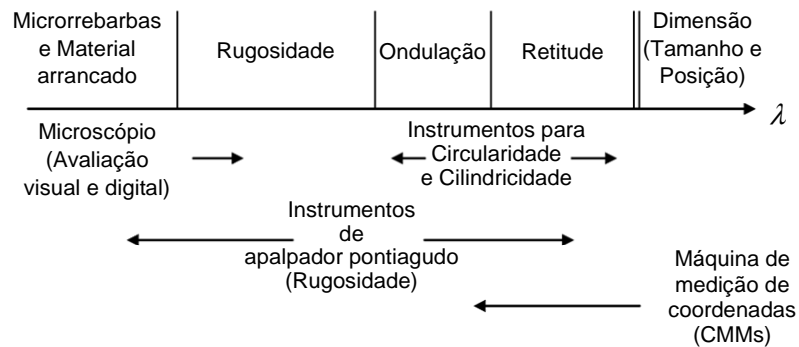


Figura 10.12 – Visão geral dos instrumentos de medição correntes. Adaptada de [R1, M5]

Nos últimos quinze anos, houve uma série de avanços significativos nas técnicas de filtragem. O filtro gaussiano que, hoje em dia, é amplamente utilizado, sofre de várias insuficiências. Para começar, o perfil da ondulação apresenta uma distorção junto das extremidades (em perfis abertos). De facto, é corrente fazer a remoção de meio ou de um comprimento de onda de corte, no início e no fim dos perfis de rugosidade e de ondulação, de modo a limitar a distorção nas extremidades. Para traçados já de si curtos, a rejeição de um comprimento de onda adicional, em ambas as extremidades, não é uma solução aceitável.

Outro problema com o filtro gaussiano é que o perfil de ondulação não segue a textura, na presença de grandes formas, tal como quando se fazem medições em geometrias cilíndricas ou esféricas. É bastante comum remover, em primeiro lugar, a superfície nominal ajustada, antes de aplicar o filtro para este fim. Uma terceira desvantagem do filtro gaussiano é não ser robusto em termos de valores mais extremos atípicos (“*outliers*”). Um grande pico ou um grande vale distorce o perfil de ondulação na vizinhança daquele.

Os filtros splines (ISO 16610-22) e de regressão gaussianos ultrapassam os problemas de distorção nas extremidades e de fraco desempenho na presença de grandes formas, enquanto os filtros splines robustos (ISO/TS 16610-32) e os filtros de regressão gaussianos robustos (ISO/TS 16610-31) ultrapassam os três problemas. Os filtros baseados em onduletas (“*wavelets*”) (ISO 16610-29) vão arranjando, também, cada vez mais aplicações na medição dos estados de superfície, uma vez que proporcionam um modo eficaz de partição de um perfil em bandas de comprimento de onda múltiplas e estreitas, algo não exequível com o filtro gaussiano. Os filtros morfológicos (ISO 16610-40 e -41) e as técnicas de análise espaço-escala (ISO 16610-49), tal como mencionado anteriormente, oferecem uma perspetiva inteiramente diferente à filtragem e estão a encontrar novas e interessantes aplicações [R1, M5].

Com o desenvolvimento dos diversos métodos de medição com e sem contacto, registado nas últimas décadas, e a extensão da avaliação dos estados de superfície do domínio bidimensional (métodos do perfil) para o domínio tridimensional (superfícies), os métodos de medição dos estados de superfície (ver ISO 25178-6) podem, atualmente, ser classificados em:

- a) **Métodos do perfil linear** – métodos de medição da topografia das superfícies que produzem um gráfico ou um perfil, a duas dimensões, das irregularidades da superfície, sob a forma de dados de medição que podem ser representados matematicamente como uma função da altura  $z(x)$ . São utilizados sobretudo para qualificar o estado de superfície numa porção de superfície escolhida e não em perfis simples.
- b) **Métodos de topografia de superfícies** – métodos de medição de superfícies que produzem uma imagem topográfica de uma superfície que pode ser representada matematicamente como uma altura  $z(x, y)$  em função de duas variáveis independentes ( $x, y$ ). A capacidade de medição de superfícies destes métodos deriva, muitas vezes, de um conjunto de perfis paralelos varridos sequencialmente (ver exemplo na figura 10.13) ou a partir da manipulação de imagens 2D obtidas por microfotografias.

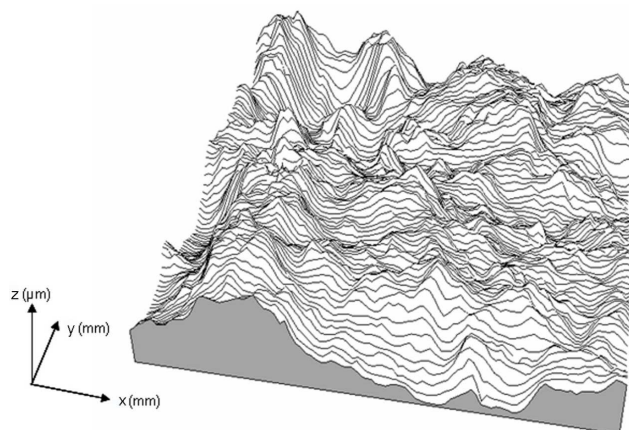


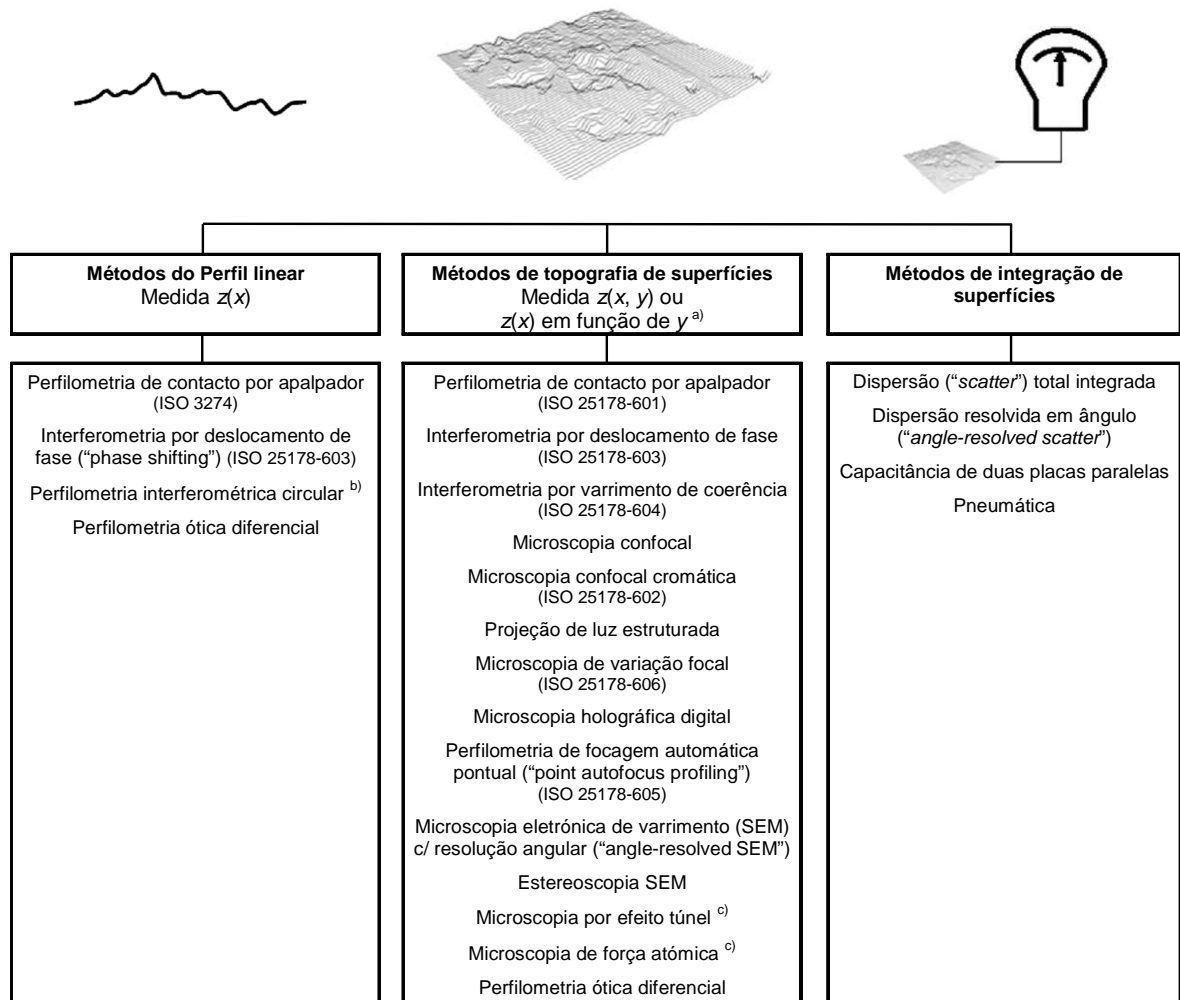
Figura 10.13 – Exemplo de uma imagem topográfica obtida por um método de topografia de superfícies, traçada como uma série de perfis paralelos (ISO 25178-6)

- c) **Métodos de integração de superfícies** – métodos de medição de superfícies que medem uma zona representativa de uma superfície e produzem resultados numéricos que dependem das propriedades de estado de superfície integradas na zona. Não fornecem dados sobre o perfil linear  $z(x)$  ou sobre a topografia das superfícies  $z(x, y)$ . Alguns destes métodos foram utilizados com padrões de comparação visotátil de rugosidade calibrados ou padrões piloto calibrados, afim de distinguir o estado de superfície de peças fabricadas por meio de processos similares ou de realizar avaliações repetitivas do estado de superfície.

Na figura 10.14, apresenta-se uma classificação dos métodos de medição dos estados de superfície ilustrada com a indicação, a título de exemplo, de um número significativo de métodos. A norma ISO 25178-6 chama a atenção dos potenciais utilizadores para o facto dos métodos de metrologia de



superfícies estarem sujeitos a um certo número de limitações, resultantes, por exemplo, da falta de homogeneidade da superfície a medir, do intervalo de medição e da resolução requeridos e da necessidade de efetuar medições em superfícies fortemente inclinadas, abordando estes temas, de modo mais desenvolvido, no Anexo A do referido documento normativo.



<sup>a)</sup> A exatidão do perfil  $z(y)$  depende do método e deverá ser verificada para cada método.

<sup>b)</sup> Esta técnica apoia-se no varrimento circular para obter um perfil  $z(\theta)$ .

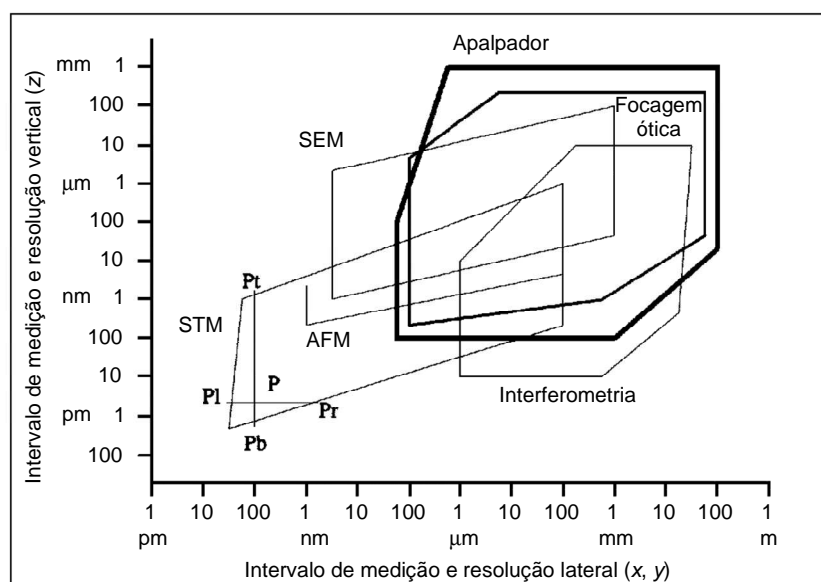
<sup>c)</sup> A STM ("scanning tunnelling microscopy") e a AFM ("atomic force microscopy") são muitas vezes classificadas como "scanned probe microscopies" (SPM), isto é "microscopias de varrimento por sonda". Outras técnicas SPM, tais como a "microscopia ótica de varrimento de campo próximo" ("near-field scanning optical microscopy") (NSOM/SNOM) ou a "microscopia de varrimento por capacitância" ("scanning capacitance microscopy") (SCM), poderiam também ser utilizadas ou adaptadas para a medição da topografia.

Figura 10.14 – Classificação de métodos de medição de estados de superfície, com exemplos (ISO 25178-6)

Assim, não é possível dizer qual é a melhor das técnicas indicadas, na figura 10.14, pois cada uma delas tem vantagens e inconvenientes para determinadas utilizações particulares. Por sua vez, os utilizadores têm diferentes requisitos para as suas aplicações específicas e limites orçamentais em termos da instrumentação. No entanto, é possível estabelecer qual o melhor instrumento a utilizar numa dada aplicação, dependendo dos requisitos do utilizador. A referência [S4] fornece um guia com as vantagens das diferentes técnicas, enumera as características importantes e faz alguns comentários relativamente aos diferentes tipos de instrumentos.

O intervalo de medição (“*measurement range*”) e a resolução, bem como uma medida derivada das duas (a relação intervalo/resolução), são características muito importantes nos instrumentos 3D. As duas primeiras características dos instrumentos determinam a sua capacidade para resolver objetos pequenos e o seu campo de aplicação (p. ex., bioengenharia, ótica ou engenharia mecânica). A terceira característica indica a sua capacidade para efetuar medições integradas, isto é, para medir mais do que um elemento de superfície, ao mesmo tempo, p. ex. rugosidade de superfície e forma. Quanto maior for a relação intervalo de medição/resolução, maior será a possibilidade de integração de muitos elementos da geometria, na medição [S4].

Para comparar os desempenhos dos diferentes tipos de instrumentos, na figura 10.15, apresenta-se um gráfico amplitude / comprimento de onda de alguns instrumentos. Na figura, os dois eixos do gráfico representam a resolução (em relação à origem dos eixos) e o intervalo de medição (afastado da origem dos eixos) dos instrumentos, nas direções horizontal e vertical. Cada bloco, na figura, representa a área de trabalho de cada instrumento. Desenhando uma linha horizontal e outra vertical, perpendiculares entre si, a partir de um ponto de trabalho P, representado na área de trabalho, as interseções  $P_b$  e  $P_l$ , nas extremidades inferior e lateral esquerda, fornecem as resoluções neste ponto de trabalho e as interseções  $P_t$  e  $P_r$ , nas extremidades superior e lateral direita, indicam os intervalos de trabalho. O comprimento de cada linha é uma indicação da relação intervalo/resolução (“*ratio of range to resolution*”) nas direções correspondentes. Quanto maior o comprimento, maior será essa relação.



**Legenda:**

- STM – Microscopia de varrimento por efeito túnel (“*scanning tunnelling microscopy*”) (1981)
- SEM – Microscopia eletrônica de varrimento (“*scanning electron microscopy*”)
- AFM – Microscopia de força atômica (“*atomic force microscopy*”) (1986)

Figura 10.15 – Gráfico amplitude / comprimento de onda estimados de sistemas 3D. Adaptada de [S4]

Verifica-se que o sistema de medição STM/AFM tem a mais alta das resoluções em ambas as direções, no entanto, o intervalo de medição é pequeno. Este facto indica que os sistemas STM/AFM

são fundamentalmente apropriados para a medição de superfícies materiais ou biológicas, na escala atômica ou micrométrica.

O instrumento por apalpador (perfilómetro de contacto) tem um intervalo vertical grande; embora a sua resolução vertical mais elevada possa ser de nível subnanométrico, é o mais adequado para a medição de superfícies de engenharia à escala do micrometro ou do submicrometro. A grande relação intervalo/resolução, na direção horizontal, permite que o instrumento por apalpador tenha um processo de recolha de informação integrada para a rugosidade, ondulação e forma e outros elementos topográficos deixados pelos processos de fabricação.

O instrumento ótico por focagem tem uma resolução ligeiramente inferior ao instrumento por apalpador nas direções horizontal e vertical. No entanto, o seu intervalo de medição na direção vertical passou através da barreira do comprimento de onda da luz incidente ( $\lambda \approx 650 \text{ nm}$ ) que é ainda uma desvantagem efetiva para outros instrumentos óticos. A propriedade do instrumento de deteção focal possuir grandes intervalos de medição vertical e horizontal torna-o adequado para a medição de superfícies semelhantes às apropriadas para instrumentos por apalpador.

A interferometria tem a resolução mais elevada (ao nível subnanométrico) na direção vertical, mas a resolução horizontal não lhe é comparável, sendo mesmo inferior à do instrumento por apalpador. O intervalo de medição vertical é pequeno devido às limitações do comprimento de onda da luz incidente. Este aspeto torna-a sobretudo adequada para a medição de superfícies finas, tais como óticas e circuitos eletrónicos, à escala nanométrica ou submicrométrica.

A característica da resolução da SEM quantitativa é o reverso da verificada na interferometria. A sua resolução horizontal mais elevada é, no máximo, de vários nanómetros, enquanto a resolução vertical nunca lhe é superior. O intervalo vertical é também pequeno. Por isso, habitualmente, o SEM é útil para a obtenção de uma imagem topográfica, ao invés de informação quantitativa 3D.

Em 2000, Kenneth Stout et al. [S4], ao analisar o estado-da-arte dos instrumentos de medição e das técnicas 3D de avaliação dos estados de superfície, sublinhava já os seguintes aspetos:

- existem muitos instrumentos comerciais disponíveis para a medição quantitativa da topografia de superfícies 3D;
- os instrumentos são baseados em diferentes princípios de medição;
- o intervalo de trabalho dos instrumentos abrange desde as dimensões atômicas até tamanhos de componentes de grandes máquinas;
- os instrumentos são complementares na medição, tendo cada um deles o seu campo ideal de aplicação;
- alguns instrumentos óticos e de microscopia de varrimento por sonda permitem realizar medições em tempos inferiores ao normal, em resultado das suas melhores características de resposta em frequência;
- a medição em 3D vai tendo uma utilização crescente e os seus instrumentos são amplamente

utilizados em domínios tais como: engenharia/ciência mecânica, de produção, eletrotécnica, ótica, química, biológica e biomédica.

A medição tridimensional de estados de superfície tem-se desenvolvido, desde a década de 80 do século XX, mas, nos anos mais recentes, o seu progresso foi mais rápido, graças ao aparecimento de microcomputadores bastante potentes e de outras técnicas avançadas de medição e análise. Daí resultará, por um lado, a sua aplicação a uma gama de produtos cada vez maior, com uma interpretação mais abrangente dos resultados das medições nos domínios da engenharia e das ciências, e, por outro, privilegiando o desenvolvimento de instrumentos de medição, concentrando os esforços no alargamento das relações intervalo de medição/resolução e na investigação das técnicas sem contacto.

### 10.3 Métodos de medição correntes dos estados de superfície

Apesar da diversidade de métodos de medição bidimensionais (métodos do perfil) e tridimensionais (de superfície) passíveis de utilização na avaliação dos estados de superfície (rugosidade e ondulação), atualmente disponíveis e já referidos nas secções anteriores deste texto, o método normalizado mais utilizado, a nível industrial, ainda é o método de avaliação do perfil de uma superfície por meio de instrumentos de contacto por apalpador (*“stylus”*), definidos na norma ISO 3274:1996 e idênticos ao esquematizado na figura 10.16 a), que exploram a superfície com um apalpador e fazem a aquisição de dados relativos aos desvios na forma de um perfil de superfície, calculam parâmetros e podem fazer o registo da informação derivada do perfil. Estes instrumentos designam-se por **rugosímetros** ou **perfilómetros de contacto por apalpador**.

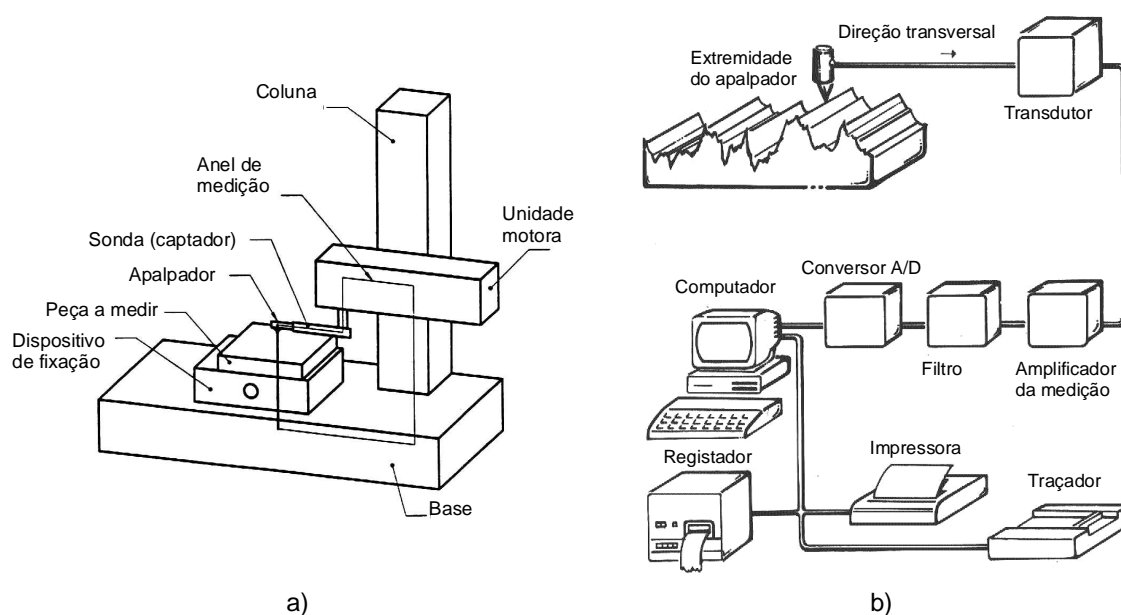


Figura 10.16 – Exemplo de um instrumento de apalpador (rugosímetro ou perfilómetro de contacto)

A extremidade do apalpador percorre a superfície da peça, de modo a fornecer ao utilizador uma medição de perfil bidimensional, ver figura 10.16 b). O deslocamento do apalpador é detetado e convertido num sinal elétrico através de um transdutor. O sinal elétrico é amplificado e convertido em informação digital que é finalmente processada por um computador.

Na avaliação dos estados de superfície, com o auxílio de rugosímetros ou perfilómetros de contacto, a separação das diferentes irregularidades geométricas de perfil (**perfil primário**, **perfil de ondulação** e **perfil de rugosidade**) faz-se por intermédio de uma filtragem digital (ver figuras 10.10, 10.11, 10.17 e 10.43), embora uma adequada escolha da extremidade (raio) do apalpador [ver figura 10.16 b)], em função do filtro de perfil  $\lambda_c$  (ISO 3274), seja também muito importante para a aquisição de dados relativos ao perfil (filtragem mecânica).

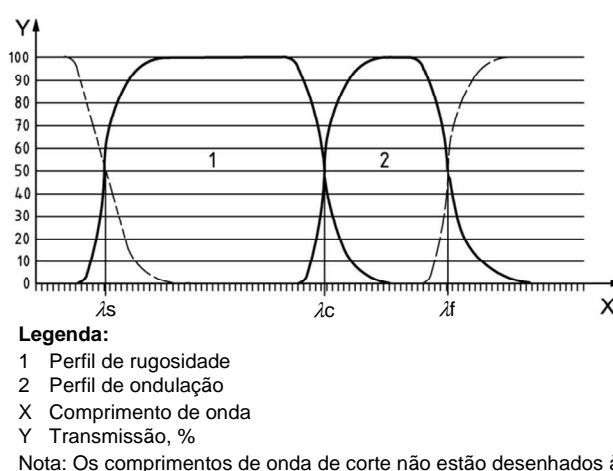


Figura 10.17 – Características de transmissão de perfis de rugosidade e de ondulação (ISO 4287)

O **perfil primário** (ISO 3274) é o perfil total após a aplicação de um filtro de onda-curta (*“short wavelength filter”*),  $\lambda_s$ . O perfil primário representa a base para o processamento do perfil digital, através de um filtro de perfil, e o cálculo dos parâmetros de perfil, em conformidade com a ISO 4287. Por sua vez, o **perfil total** é a forma digital do **perfil traçado** (que é o lugar geométrico do centro da extremidade de um apalpador, à medida que ele percorre a superfície segundo o plano normal de interseção, representado na figura 10.1) em relação ao **perfil de referência** [que é o caminho percorrido pela sonda – ver figura 10.16 a) – no plano de interseção, ao longo da referência de guiamento].

O **perfil de ondulação** (ISO 4287) é um perfil derivado a partir do perfil primário por aplicação sucessiva dos filtros de perfil  $\lambda_f$  e  $\lambda_c$ , suprimindo, assim, os componentes de grande comprimento de onda (ou de baixa frequência), com a ajuda do filtro de perfil  $\lambda_f$ , e os componentes de comprimento de onda curta (ou de alta frequência), com a ajuda do filtro de perfil  $\lambda_c$  (ver figura 10.17).

O **perfil de rugosidade** (ISO 4287) é um perfil derivado a partir do perfil primário por supressão dos componentes de grande comprimento de onda, aplicando o filtro de perfil  $\lambda_c$ . A banda de transmissão (ver secção 10.10.3) dos perfis de rugosidade é definida pelos filtros de perfil  $\lambda_s$  e  $\lambda_c$  (ver figura 10.17).

Os **filtros de perfil** (gaussianos) permitem separar o perfil de superfície em componentes de comprimento de onda longa (*“long-wavelength”*) e componentes de comprimento de onda curta (*“short-wavelength”*), ver ISO 11562 e ISO 16610-21. Nos instrumentos de medição de perfis de rugosidade, de ondulação e primários, utilizam-se três filtros (ver figura 10.17), todos com as mesmas características de transmissão definidas na ISO 11562, mas com comprimentos de onda de corte (*“cut-off wavelengths”*) diferentes.

O **filtro de perfil  $\lambda_s$**  define a separação entre as componentes de rugosidade e as componentes de onda ainda mais curtas, presentes na superfície (ver figura 10.17). O resultado direto deste processo de filtragem é um perfil mais suave em que os pequenos comprimentos de onda foram atenuados.

O **filtro de perfil  $\lambda_c$**  define a separação entre as componentes de rugosidade e as componentes de ondulação, presentes na superfície (ver figura 10.17). Neste caso, o perfil mais suave resultante desta filtragem é a linha média da rugosidade (que corresponde à ondulação e ao desvio de forma) e o perfil de rugosidade é determinado através da subtração desta linha média ao perfil medido original.

O **filtro de perfil  $\lambda_f$**  define a separação entre as componentes de ondulação e as componentes de onda ainda mais longas, presentes na superfície (ver figura 10.17). O perfil de ondulação é a linha média de rugosidade após separação posterior do desvio de forma.

Os atuais perfilómetros de contacto por apalpador sofreram uma redefinição com a norma ISO 3274:1996. Os instrumentos com patim [ver figura 10.18 b)] deixaram de ser normalizados. O valor “verdadeiro” de um parâmetro de um estado de superfície passou a dever ser definido através de um instrumento de medição absoluto [ver figura 10.18 a)].

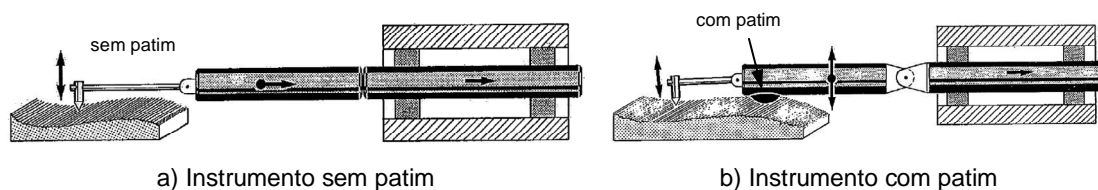


Figura 10.18 – Exemplos de perfilómetros de contacto por apalpador. Adaptada de [M4]

Nos perfilómetros com patim, o patim segue as irregularidades macrogeométricas da superfície enquanto o apalpador percorre o perfil microgeométrico [ver figura 10.18 b)]. O ajuste deste tipo de instrumentos para uma medição é simples, pois a unidade sensora não tem de ser nivelada exatamente em relação à peça e é menos sensível à vibração. No entanto, devido ao seu modo de operação, este tipo de perfilómetros não pode medir ondulações nem desvios de forma, levando a uma filtragem do perfil avaliado que poderá ser indesejável, sobretudo em casos em que estas características são funcionalmente importantes.

Por sua vez, nos perfilómetros sem patim, a unidade sensora é fixa rigidamente a um elemento de referência exterior e o seu intervalo de medição engloba as irregularidades macro e microgeométricas

das superfícies [ver figura 10.18 a)]. A medição efetuada deste modo poderá englobar também, para além da rugosidade, a ondulação e os desvios de forma.

Este tipo de instrumentos de medição pode ser utilizado com proveito, quer no controlo e na verificação do desempenho dos processos de fabricação, quer na análise das superfícies das peças em termos do seu comportamento tribológico (atrito, desgaste, etc.). A medição de superfícies geradas nas peças durante a sua produção, pode monitorizar o efeito de vibrações, desvios nos guiamentos das máquinas, desafinações, etc. As superfícies são muito sensíveis a mudanças verificadas durante o processo produtivo, revelando alterações ocorridas no processo ou na máquina-ferramenta. Exemplos de utilização de perfilómetros de contacto por apalpador (rugosímetros), no controlo da produção, são visíveis nas figuras 10.19 (unidade estacionária) e 10.20 (versão portátil).

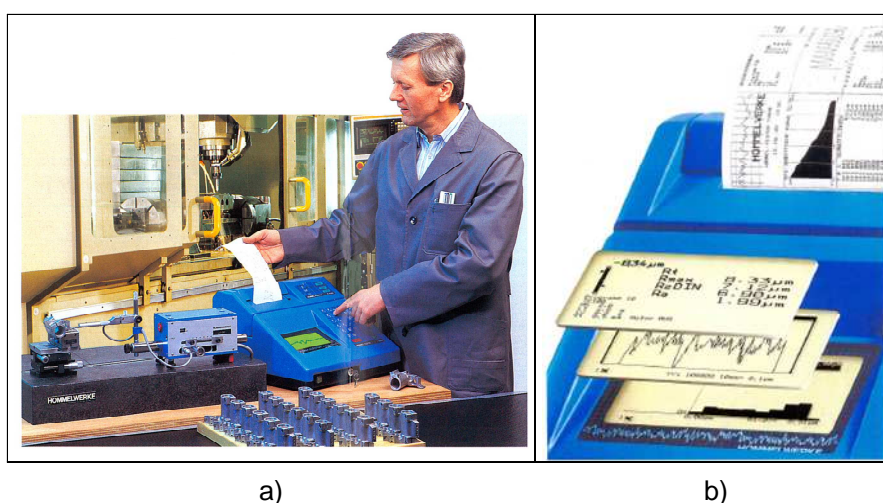


Figura 10.19 – Exemplo de perfilómetro de contacto com microprocessador: a) em trabalho oficial; b) com edição de resultados das medições. Adaptada de HOMMELWERKE – Complete catalogue



Figura 10.20 – Exemplo de perfilómetro de contacto portátil em utilização durante o processo de fabricação. Adaptada de HOMMELWERKE – Complete catalogue

Por sua vez, em termos da verificação da funcionalidade das superfícies, a qualidade destas pode ser absolutamente fundamental em termos do desempenho da peça e os parâmetros utilizados no seu controlo podem ser diferentes dos empregues na monitorização do processo de fabricação. Na figura 10.21, apresentam-se exemplos de controlo de qualidade de superfícies, em termos laboratoriais.



a) Unidade estacionária

b) Perfilômetro portátil em unidade estacionária

Figura 10.21 – Exemplos de perfilômetros de contacto (rugosímetros) em trabalho laboratorial de controlo de qualidade de superfícies. Adaptada de HOMMELWERKE – Complete catalogue

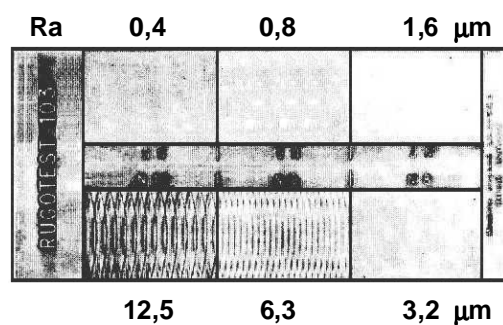
Por outro lado, embora não sejam instrumentos de medição propriamente ditos, os **padrões de comparação visotátil de rugosidade**, que surgiram na década de quarenta do séc. XX e sofreram posteriores aperfeiçoamentos que conduziram à sua normalização internacional, através das normas da série ISO 2632, na década de 70, são ainda hoje utilizados nas pequenas unidades industriais e no âmbito do processo de desenvolvimento de produtos, uma vez que são um modo rápido e prático de fornecer um valor aproximado da rugosidade das superfícies, aos técnicos da produção, e servem de referência para os projetistas que pretendem especificar valores de rugosidade em desenhos de conceção, [P1, B4, M4].

Estes padrões são superfícies reais ou reproduções de topografias de superfícies reais (planas ou cilíndricas), produzidas por diferentes processos de fabricação e caracterizadas por um ou vários critérios com valores diferentes e conhecidos, resultantes de um mesmo processo de fabricação (ver exemplos na figura 10.22).

Ra 12,5 6,3 3,2 1,6 0,8 0,4 0,2 0,1 0,05  $\mu\text{m}$



a) Placas-padrão RUGOTEST nº 1



b) Placas-padrão RUGOTEST nº 103, [C2]

Figura 10.22 – Exemplos de padrões de comparação visotátil de rugosidade



As 27 placas-padrão “RUGOTEST” nº 1, apresentadas na figura 10.22 a), destinam-se ao controlo de superfícies obtidas por fresagem cilíndrica [A (N10 a N8)], retificação cilíndrica [A (N7 a N2)]; fresagem frontal [B (N10 a N6)], rodagem [B (N5 a N2)]; torneamento – aplainamento [C (N10 a N6)] e “*honing*” – superacabamento [C (N5 a N2)]. Por sua vez, as 6 placas-padrão “RUGOTEST” nº 103, apresentadas na figura 10.22 b), destinam-se ao controlo de superfícies obtidas por fresagem frontal.

Os padrões de comparação visotátil de rugosidade têm múltiplas funções, cujas mais correntes são:

- preencher uma função pedagógica, materializando os critérios dos perfis de superfície;
- facilitar uma escolha ótima das superfícies a especificar;
- ajudar a evitar as contradições técnicas durante a elaboração dos cadernos de encargos;
- facilitar o estudo e a elaboração das gamas de fabricação;
- contribuir para acelerar a execução dos trabalhos conducentes a pôr em marcha uma nova produção;
- permitir vigiar, nos locais de fabricação, a constância e a qualidade das superfícies reais;
- não sobrecarregar os serviços de controlo com medições supérfluas.

Este tipo de padrões não se utiliza na calibração dos instrumentos de medição.

## 10.4 Generalidades sobre a indicação dos estados de superfície

As regras para a indicação dos estados de superfície em documentação técnica de produtos (desenhos, especificações, contratos, relatórios, etc.), por meio de símbolos gráficos e de indicações textuais, são o objeto da norma ISO 1302.

Esta norma aplica-se na indicação de requisitos para superfícies através de:

- a) **parâmetros de perfil, ligados à linha média** (ISO 4287) e definidos a partir de um perfil obtido através de um processo de filtragem do perfil primário (**sistema da linha média**), relacionados com:
  - o perfil *R* (parâmetros de rugosidade),
  - o perfil *W* (parâmetros de ondulação),
  - o perfil *P* (parâmetros estruturais, calculados a partir do perfil primário);
- b) **parâmetros, ligados aos motivos do perfil** (ISO 12085), sendo estes identificados através da aplicação de um algoritmo do tipo “reconhecimento de forma”, no perfil primário (**sistema da linha envolvente**), relacionados com:
  - os motivos de rugosidade,
  - os motivos de ondulação,

- c) **parâmetros ligados à curva da taxa do comprimento de sustentação** (ISO 13565-2, ISO 13565-3).

A indicação de requisitos para imperfeições de superfície (poros, riscos, etc.), que não podem ser especificados através da utilização de parâmetros relativos aos estados de superfície, deve ter em conta a norma ISO 8785.

## 10.5 Parâmetros caracterizadores do estado de superfície (rugosidade)

Os diferentes parâmetros caracterizadores da rugosidade (*R*) são objeto de especificação em vários documentos normativos. Existem, fundamentalmente, três tipos de parâmetros:

- os parâmetros do perfil de rugosidade (ISO 4287), ligados à linha média;
- os parâmetros ligados aos motivos do perfil (ISO 12085);
- os parâmetros ligados à curva da taxa do comprimento de sustentação do perfil (ISO 13565).

No contexto deste trabalho, faz-se referência apenas a alguns dos parâmetros mais utilizados no controlo do estado de superfície das peças, podendo destacar-se:

### 10.5.1 Parâmetros do perfil de rugosidade ligados à linha média

Neste tipo de parâmetros podem considerar-se os parâmetros de amplitude (pico-vale e de valor médio), os parâmetros de espaçamento e curvas e parâmetros associados.

#### 10.5.1.1 Parâmetros de amplitude

Os parâmetros de valor médio das amplitudes receberam grande atenção por parte do Reino Unido e dos USA, no âmbito dos trabalhos desenvolvidos para controlar e avaliar o desempenho dos processos de fabricação, enquanto os parâmetros de amplitude (pico e vale) foram pensados para avaliar a funcionalidade das superfícies [W2].

##### 10.5.1.1.1 Parâmetros de valor médio

- a) O desvio médio aritmético do perfil de rugosidade – ***Ra***

*Ra* (“*arithmetical mean deviation*”), também designado por rugosidade média aritmética, é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas  $Z(x)$  no interior de um comprimento de base (“*sampling length*”),  $l_r$ , ver figura 10.23, (ISO 4287).

$$Ra = 1 / l_r \int | Z(x) | dx \quad (10.1)$$

Na prática, os valores de  $R_a$  são determinados no interior de um comprimento de avaliação (“*evaluation length*”),  $l_n$ , formado por vários comprimentos de base, de modo a aumentar a estabilidade dos resultados obtidos [W2]. De acordo com a norma ISO 4288, por omissão,  $l_n = 5 l_r$  (ver as secções 10.10.1 e 10.10.3 deste texto).

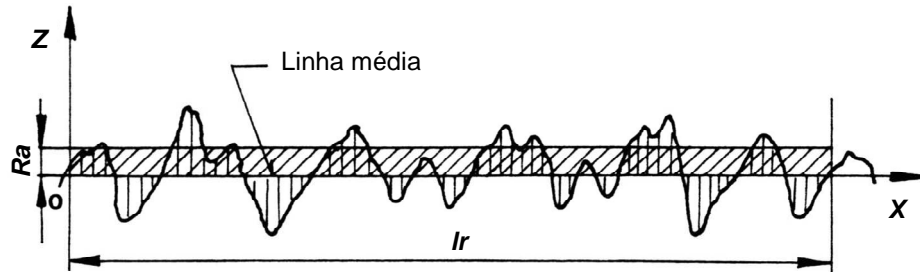


Figura 10.23 – Desvio médio aritmético –  $R_a$

A rugosidade média aritmética  $R_a$  é um critério estatístico microgeométrico que se relaciona apenas com o perfil de rugosidade, cuja curva de distribuição de amplitudes pode, geralmente, ser aproximada por uma distribuição Normal (ou de Gauss) [S3].

Por definição,  $R_a$  não permite diferenciar os perfis inversos, relativamente à linha média (eixo dos  $XX$ ), e, portanto, não fornece nenhuma informação sobre a robustez ou fragilidade de um perfil, nem sobre a aptidão das peças para exercerem convenientemente a função para que foram projetadas. Este critério é relativamente pouco sensível aos valores acidentais de amplitude máxima, que não têm qualquer ação funcional, e também a um pico ou vale atípico, ocultando o defeito, mas permite diferenciar diversos perfis de rugosidade característicos [R2, M3, M4].

Assim, o parâmetro  $R_a$ , o mais utilizado em todo o mundo, disponível em quase todos os equipamentos de medição (embora não seja fácil de obter por via ótica [W2]) e aplicável à maioria dos processos de fabricação, é utilizado, fundamentalmente, nos seguintes casos [M4, S3]:

- no controlo de um processo produtivo onde podem ocorrer mudanças graduais no acabamento superficial, resultantes do desgaste da ferramenta de corte;
- em superfícies em que o acabamento apresenta estrias das operações de corte por arranque de apara bem orientadas (torneamento, fresagem, etc.);
- em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins estéticos.

Em processos de fabricação com uma frequência muito elevada de picos ou vales, como é o caso da sinterização, este parâmetro não é adequado, devido a problemas de filtragem no sistema de medição.

b) O desvio médio quadrático do perfil –  $R_q$ 

$R_q$  (ISO 4287), também designado por  $\sigma$ , ou R.M.S. (“root mean square deviation”), é a média quadrática dos valores das ordenadas  $Z(x)$ , no interior de um comprimento de base,  $l_r$ . Na prática, os valores de  $R_q$  ( $\sigma$ ) são determinados no interior de um comprimento de avaliação,  $l_n$ , formado por vários comprimentos de base.

$$R_q = \left( \frac{1}{l_r} \int Z^2(x) dx \right)^{0.5} \quad (10.2)$$

Basicamente, as observações produzidas para  $R_a$  são também válidas para o critério  $R_q$  ( $\sigma$ ), embora este critério possa também ser medido por via ótica [W2] e seja mais sensível aos valores acidentais de amplitude máxima de rugosidade. Diferentes referências indicam uma relação do tipo  $R_q$  ( $\sigma$ ) = 1.1 a 1.3  $R_a$  [R2, H2, M3 e M4]. Whitehouse [W3], por exemplo, aponta uma relação  $R_q = 1.1 R_a$ , para rugosidades de perfil sinusoidal, mas considera que, para superfícies de rugosidade aleatória (obtidas por retificação), a relação  $R_q = 1.25 R_a$  é mais adequada.

No estudo do funcionamento de mecanismos lubrificados, é comum a utilização do critério R.M.S. que, apesar de ter sido abandonado por boa parte dos documentos normativos nacionais, continua especificado na atual norma ISO 4287.

## 10.5.1.1.2 Parâmetros pico-vale

a) A altura total do perfil de rugosidade –  $R_t$ 

$R_t$  (“total height of profile”) é a soma da maior das alturas de pico do perfil,  $Z_p$ , com a maior das profundidades de vale do perfil,  $Z_v$ , no interior do comprimento de avaliação, ver figura 10.24, (ISO 4287).

$$R_t = Z_{p \max} + Z_{v \max} \quad (10.3)$$

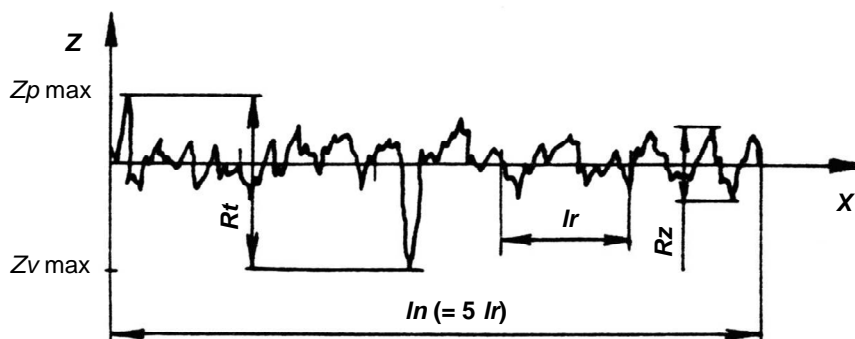


Figura 10.24 – Altura total do perfil de rugosidade –  $R_t$

Este parâmetro retoma um conceito, existente nas antigas normas DIN 4762 Parte 1:1960 e NF E 05-015:1972, que tinha sido abandonado até ao final da década de 90. Segundo as

normas DIN 4768 Parte 1, Suplemento 1:1978 e DIN 4762:1989 (anulada posteriormente pela publicação da DIN EN ISO 4287), este parâmetro era ambíguo, pois admitia, à época, diferentes interpretações, tendo sido sugerida a sua substituição por  $R_{max}$  e  $R_z$ , segundo a DIN 4768 Parte 1:1974, uma vez que os valores de  $R_t$  eram geralmente medidos da mesma maneira como, atualmente, o são os valores de  $R_z$  (DIN). Aconselhava-se, então, a sua não utilização em novas aplicações.

A norma ISO 4287 define também o parâmetro altura máxima do perfil ("*maximum height of profile*"),  $R_z$ , como sendo a soma da maior das alturas de pico do perfil,  $Z_p$ , com a maior das profundidades de vale do perfil,  $Z_v$ , no interior de um comprimento de base,  $l_r$  (ver figura 10.24). Atendendo a que a altura total do perfil de rugosidade,  $R_t$ , é definida sobre o comprimento de avaliação,  $l_n$ , e não sobre um comprimento de base, a relação  $R_t \geq R_z$  terá de ser sempre respeitada para qualquer perfil.

O parâmetro  $R_t$ , muito aplicado na maioria dos países e de fácil obtenção no equipamento de medição atual, pode ser utilizado nos seguintes casos [S3]:

- em superfícies de vedação;
- em superfícies de alojamento de juntas de vedação;
- em superfícies sujeitas a ações dinâmicas;
- em tampões, em geral;
- em parafusos fortemente solicitados;
- em superfícies de deslizamento, em que o perfil efetivo é periódico.

A altura total do perfil de rugosidade,  $R_t$ , é um critério muito sensível aos valores extremos das rugosidades, em particular à existência de picos e vales aberrantes [R2]. No entanto, deve ter-se em conta que pode não existir uma relação significativa entre o maior pico e o maior vale considerados. Os parâmetros  $R_z$  (DIN) e  $R_{max}$  são, geralmente, de maior utilidade [M4]. Todos estes parâmetros podem ser uma boa medida da severidade da fenda (problemas de fadiga), fornecendo informações complementares às de  $R_a$  (que dilui os valores de picos e vales atípicos).

b) A média das alturas máximas do perfil de rugosidade –  **$R_z$**

$R_z$  (DIN 4768) é a média aritmética das alturas máximas do perfil  $Z_i$  (iguais a  $R_z$ , ISO 4287), medidas em cinco comprimentos de base,  $l_r$ , consecutivos ("*arithmetical mean value of peak-to-valley height*"), ver figura 10.25. A maior das alturas máximas de perfil  $Z_i$ , verificada no interior do comprimento de avaliação,  $l_n$ , ("*maximum peak-to-valley height*"), designa-se por  $R_{max}$ .

$$R_z = 1 / 5 ( Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 ) \quad (10.4)$$

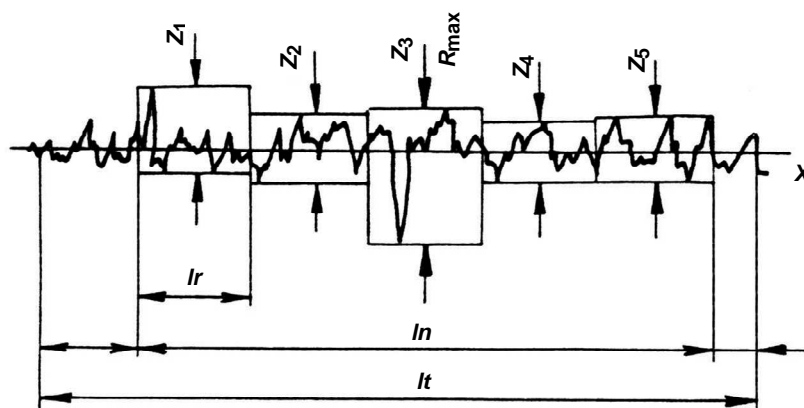


Figura 10.25 – Média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade –  $R_z$  (DIN 4768)

$R_z$  (DIN) é geralmente mais sensível às mudanças no acabamento superficial do que  $R_a$ , sendo um critério útil no controlo de um processo produtivo [M4]. A norma ISO 4288 define um estimador médio do parâmetro  $R_z$  calculado através da média aritmética dos estimadores de  $R_z$ , obtidos em todos os comprimentos de base individuais constituintes do comprimento de avaliação, (por omissão,  $l_n = 5 l_r$ ).

Assim, na prática, o parâmetro  $R_z$  (ISO 4287) acaba por ser equivalente a  $R_z$  (DIN) e, em alguma documentação técnica, sugere-se a aplicação da seguinte relação aproximada:  $R_z$  (ISO)  $\approx 6 R_a$ .

O parâmetro  $R_z$  (ISO)  $\Leftrightarrow R_z$  (DIN), de fácil obtenção em equipamentos de medição atuais, pode ser utilizado nos seguintes casos [S3]:

- em superfícies onde defeitos isolados não têm influência na função da peça a controlar (p. ex.: em superfícies de apoio e de deslizamento, em ajustamentos com aperto, etc.);
- em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido.

Este parâmetro fornece indicação sobre a deterioração vertical média das superfícies e define muito bem as superfícies, em perfis periódicos, mas não dá informações suficientes sobre as formas dos perfis e seus comprimentos de onda. Por outro lado, os riscos isolados são considerados apenas parcialmente, de acordo com o número de defeitos isolados. Logo, em algumas aplicações, esta consideração parcial de defeitos isolados não é aconselhável, pois um defeito isolado significativo será considerado somente em 20 % (1/5) [S3].

Por sua vez, os campos de aplicação e as vantagens na utilização do parâmetro  $R_{max}$  são idênticos aos referidos para  $R_t$ . Ambos os parâmetros fornecem informação sobre a máxima deterioração vertical das superfícies, mas que muitas vezes não é representativa da superfície como um todo. O parâmetro  $R_{max}$  é útil em superfícies onde não é admissível a existência de um único defeito significativo (p. ex. superfícies de vedação), mas, por si só, não apresenta informação suficiente sobre as formas das superfícies [M4].

O parâmetro  $R_z$  (ISO 468), designado por “altura das irregularidades sobre 10 pontos” (“*ten point height of irregularities*”), é a média dos valores absolutos das alturas dos cinco picos do perfil mais altos e das profundidades dos cinco vales do perfil mais fundos, no interior do comprimento de base,  $l_r$  (ver figura 10.26). Este parâmetro foi suprimido na atual normalização ISO sobre o estado de superfície, mas continua ainda a ser referido em muitas das normas ISO atualmente em vigor.

$$R_z = \left( \sum_{i=1}^5 |Z_{p_i}| + \sum_{i=1}^5 |Z_{v_i}| \right) / 5 \quad (10.5)$$

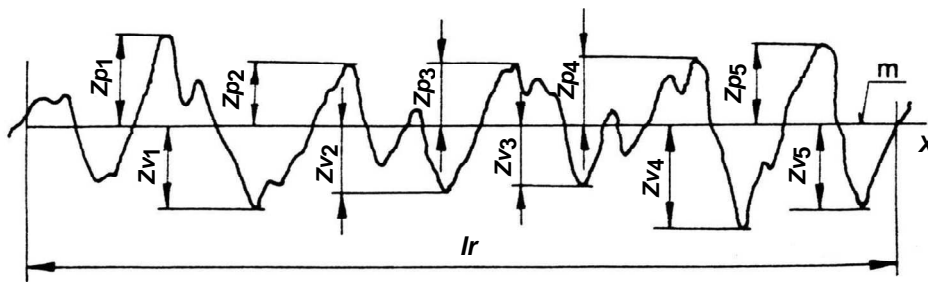


Figura 10.26 – Altura das irregularidades sobre 10 pontos –  $R_z$  (ISO 468)

Vários documentos sugerem a aplicação da seguinte relação aproximada:  $R_z$  (ISO 468)  $\approx 6 R_a$ . A altura das irregularidades sobre 10 pontos,  $R_z$  (ISO 468), é recomendada para os casos em que apenas está disponível uma superfície pequena, onde o critério  $R_z$  (DIN) não pode ser utilizado [M3, M4]. O critério  $R_z$  (ISO 468) pode ser influenciado por picos e vales pouco representativos da superfície.

c) A altura máxima de pico do perfil –  $R_p$

$R_p$  (ISO 4287), também designado por profundidade de aplanamento (“*maximum profile peak height*”), é a maior das alturas de pico do perfil,  $Z_p$ , no interior de um comprimento de base  $l_r$  (ver figura 10.27). Este parâmetro permite definir uma linha média do perfil de rugosidade (eixo dos XX), também utilizada em outros critérios de rugosidade [M3].

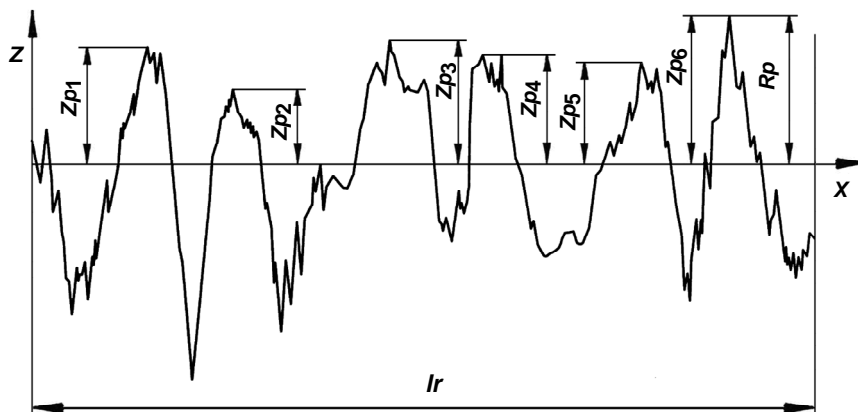


Figura 10.27 – Altura máxima de pico do perfil –  $R_p$  (ISO 4287)

A altura máxima de pico do perfil,  $R_p$ , é um critério muito sensível aos valores extremos das rugosidades, particularmente à existência de picos e vales aberrantes, e permite diferenciar o comportamento de dois perfis de rugosidade inversos [R2].

### 10.5.1.2 Parâmetros de espaçamento

Os parâmetros de espaçamento só recentemente passaram a ser alvo de maior atenção por parte dos engenheiros, embora tenham sido sempre importantes para os microscopistas. O mais utilizado é o  $S_m$  (largura média dos elementos do perfil) que é a média das distâncias entre os cruzamentos do perfil com a linha média, até agora avaliada, geralmente, no interior de um comprimento de base,  $l_r$  [W2], mas que, de acordo com o projeto de emenda ISO 4287:1997/DAM 2, entretanto retirado em 2014, deveria passar a ser considerada dentro do comprimento de avaliação,  $l_n$ .

a) A largura média dos elementos do perfil de rugosidade –  **$RS_m$**

$RS_m$  (“mean width of the roughness profile elements”) é o valor médio das larguras  $X_s$  dos elementos de perfil, no interior de um comprimento de base,  $l_r$ , ver figura 10.28.

$$RS_m = 1/m \times \sum_{i=1}^m X_{s_i} \quad (10.6)$$

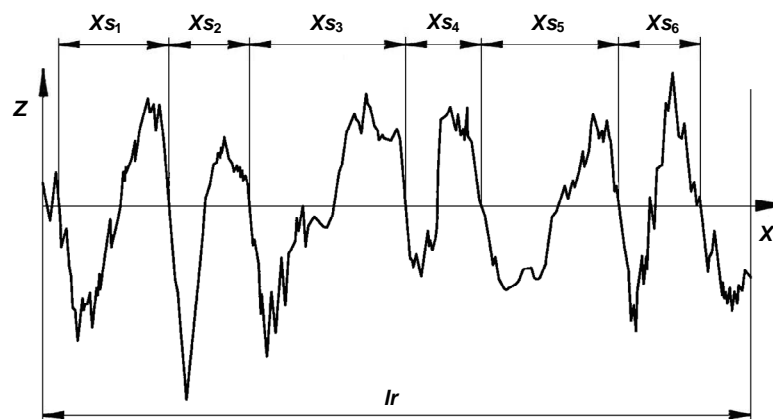


Figura 10.28 – Largura média dos elementos do perfil de rugosidade (ISO 4287:1997)

O parâmetro  $RS_m$  necessita de uma discriminação de altura e de espaçamento (valores mínimos que deverão ser tidos em consideração). A altura mínima dos picos de perfil e a profundidade mínima dos vales do perfil de rugosidade deve ser 10 % de  $R_z$ , para  $RS_m$ . O espaçamento mínimo dos picos de perfil e o espaçamento mínimo dos vales do perfil deve ser 1 % do comprimento de base. De acordo com a ISO 4288, na ausência de uma dada especificação de rugosidade na documentação técnica ou quando esta não comporta a indicação do comprimento de base, o valor do comprimento de onda de corte,  $\lambda_c$ , poderá ser escolhido a partir de uma estimativa e posterior medição do parâmetro  $RS_m$ , em perfis de rugosidade periódicos, mas também em não periódicos (ver secção 10.18 deste texto).



### 10.5.1.3 Curvas e parâmetros associados

As curvas e os parâmetros associados são todos definidos no interior do comprimento de avaliação,  $l_n$ , em vez do comprimento de base,  $l_r$ , de modo a possibilitar a obtenção de curvas e parâmetros associados com maior estabilidade (ISO 4287).

- a) A taxa do comprimento de sustentação do perfil de rugosidade –  **$Rmr(c)$**

$Rmr(c)$  (“material ratio of the roughness profile”) é a razão entre o comprimento de sustentação do perfil de rugosidade a um dado nível de corte  $c$ ,  $MI(c)$ , e o comprimento de avaliação,  $l_n$  (ISO 4287).

$$Rmr(c) = MI(c) / l_n \quad (\%) \quad (10.7)$$

O comprimento de sustentação do perfil a um nível  $c$ ,  $MI(c)$ , é igual à soma dos comprimentos dos segmentos resultantes do corte do perfil de rugosidade por uma linha paralela à linha média (eixo dos  $XX$ ), a um dado nível  $c$  ( $MI(c) = MI_1 + MI_2 + \dots + MI_n$ ), ver figura 10.29. O valor limite inferior de tolerância da taxa de comprimento de sustentação é expresso em %. Tal significa que a parte de matéria a um dado nível,  $c$ , deve corresponder, no mínimo, ao valor indicado em percentagem do comprimento avaliação.

- b) A curva da taxa do comprimento de sustentação do perfil

A Curva da taxa do comprimento de sustentação do perfil (“material ratio curve of the profile”), também designada por curva de Abbott-Firestone, já referida na secção 10.2 deste texto, representa a taxa do comprimento de sustentação do perfil em função de um dado nível  $c$ , ver figura 10.29.

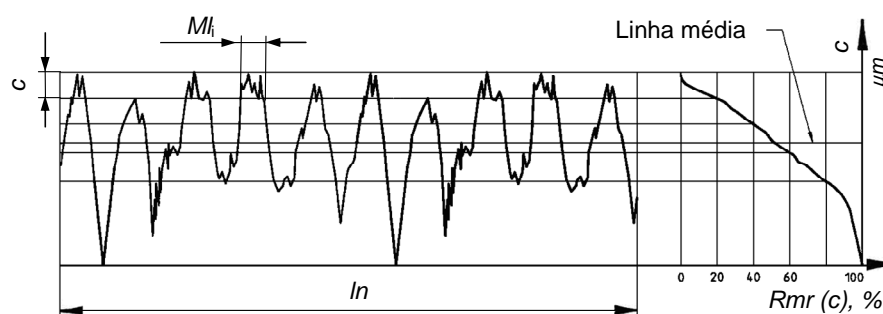


Figura 10.29 – Curva da taxa do comprimento de sustentação (ISO 4287)

Esta curva pode ser interpretada como a função de distribuição acumulada das ordenadas  $Z(x)$  no interior do comprimento de avaliação,  $l_n$ .

- c) A diferença de alturas de corte do perfil de rugosidade –  **$R\delta c$**

$R\delta c$  (“roughness profile section height difference”) é a distância vertical entre dois níveis de corte de uma dada curva da taxa do comprimento de sustentação do perfil de rugosidade (ISO 4287), ver figura 10.30.

$$R\delta c = C(Rmr1) - C(Rmr2) \quad (10.8)$$

em que,  $Rmr1 < Rmr2$ .

d) A taxa do comprimento de sustentação relativa do perfil de rugosidade – ***Rmr***

*Rmr* (“relative material ratio of the roughness profile”) é a taxa do comprimento de sustentação do perfil de rugosidade determinada para um nível de corte, a uma altura  $R\delta c$  em relação a uma referência  $C0$  (ISO 4287), ver figura 10.30.

$$Rmr = Rmr(C1) \quad (10.9)$$

em que:

$$C1 = C0 - R\delta c;$$

$$C0 = C(Rmr0).$$

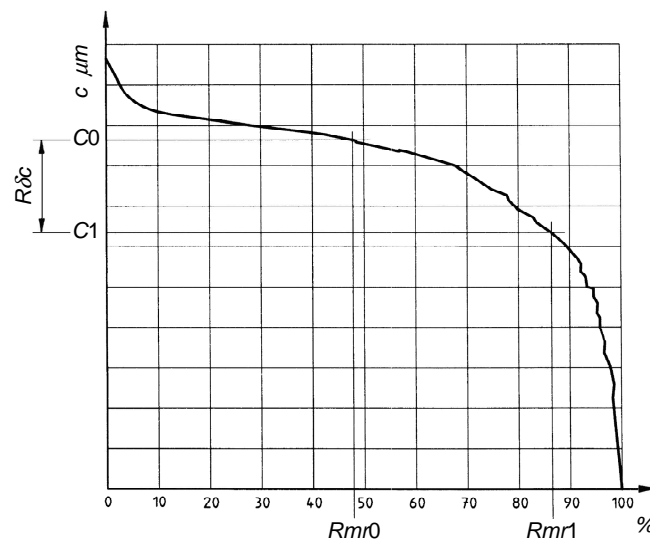


Figura 10.30 – Taxa do comprimento de sustentação relativa do perfil de rugosidade (ISO 4287)

Por omissão, o nível de referência  $C0$  deve ser especificado em função da localização de um valor da taxa de comprimento de sustentação em percentagem,  $Rmr0$ , correspondente a esse nível. Se não for especificado qualquer nível de referência, o nível de corte,  $c$ , é determinado a partir da taxa de comprimento de sustentação de 0 % ou, expresso de um modo diferente, a partir do pico mais elevado, dentro do comprimento de avaliação. Se a linha média for considerada como uma referência, tal pode ser indicado através do ajuste do nível de referência  $c$  para 50 % (ISO 1302:2002/DAM 2).

A partir da curva da taxa do comprimento de sustentação, podem ser definidos parâmetros que descrevem as características funcionais da rugosidade de superfície que são relevantes para superfícies submetidas a tensões de contacto muito elevadas.

Para superfícies submetidas a tensões de contacto muito elevadas, é essencial que os limites prescritos para os desvios de forma e de ondulação sejam valores muito pequenos.

No quadro 10.3, apresenta-se uma lista de todos os parâmetros, ligados à linha média, para a determinação do estado de superfície (perfis de rugosidade, de ondulação e primário) pelos métodos do perfil, normalizados pela ISO 4287.

Quadro 10.3 – Parâmetros do estado de superfície (ISO 4287: 1997)

Parâmetros	Ed. 1997	Determinado no	
		Comprimento de avaliação <i>ln</i>	Comprimento de base <sup>1)</sup>
Altura máxima de pico do perfil Maximum profile peak height Hauteur maximale de saillie du profil	<i>Rp</i> <sup>2)</sup>		X
Profundidade máxima de vale do perfil Maximum profile valley depth Profondeur maximale de creux du profil	<i>Rv</i> <sup>2)</sup>		X
Altura máxima do perfil Maximum height of the profile Hauteur maximale de profil	<i>Rz</i> <sup>2)</sup>		X
Altura média dos elementos do perfil Mean height of the profile Hauteur moyenne des éléments du profil	<i>Rc</i> <sup>2)</sup>		X
Altura total do perfil Total height of the profile Hauteur total du profil	<i>Rt</i> <sup>2)</sup>	X	
Desvio médio aritmético do perfil avaliado Arithmetical mean deviation of the assessed profile Écart moyen arithmétique du profil évalué	<i>Ra</i> <sup>2)</sup>		X
Desvio médio quadrático do perfil avaliado Root mean square deviation of the assessed profile Écart moyen quadratique du profil évalué	<i>Rq</i> <sup>2)</sup>		X
Factor de assimetria do perfil avaliado Skewness of the assessed profile Facteur d'asymétrie du profil évalué	<i>Rsk</i> <sup>2)</sup>		X
Curtose do perfil avaliado Kurtosis of the assessed profile Facteur d'aplatissement du profil évalué	<i>Rku</i> <sup>2)</sup>		X
Largura média dos elementos do perfil Mean width of the profile elements Largeur moyenne des éléments du profil	<i>RSm</i> <sup>2)</sup>	X	
Inclinação média quadrática do perfil avaliado Root mean square slope of the assessed profile Pente quadratique moyenne du profil évalué	<i>RΔq</i> <sup>2)</sup>		X
Taxa do comprimento de sustentação Material ratio of the profile Taux de longueur portante	<i>Rmr(c)</i> <sup>2)</sup>	X	
Diferença da altura de corte do perfil Profile section height difference Différence de hauteur de coupe du profil	<i>RΔc</i> <sup>2)</sup>	X	
Taxa do comprimento de sustentação relativa Relative material ratio Taux de longueur portante relatif	<i>Rmr</i> <sup>2)</sup>	X	
Altura sobre dez pontos ( <i>Rz</i> ) Ten point height (suprimido como parâmetro ISO) Hauteur sur dix point	---		X
<sup>1)</sup> Este comprimento de base é <i>lr</i> , <i>lw</i> e <i>lp</i> , respectivamente, para os parâmetros <i>R</i> -, <i>W</i> - e <i>P</i> -; <i>lp</i> é igual a <i>ln</i> . <sup>2)</sup> Parâmetros definidos para três perfis: perfil primário, perfil de ondulação e perfil de rugosidade. Apenas o parâmetro do perfil de rugosidade está indicado no quadro. Como exemplo, os três parâmetros são escritos <i>Pa</i> (perfil primário), <i>Wa</i> (perfil de ondulação) e <i>Ra</i> (perfil de rugosidade).			

### 10.5.2 Parâmetros do perfil de rugosidade ligados aos motivos do perfil

Em França, entre a segunda metade da década de 60 e o início da década de 70 do séc. XX, sob o impulso da indústria automóvel (CNOMO – “Comité de Normalisation des Moyens de Production”), conforme já foi referido na secção 10.2 deste texto, desenvolveu-se uma técnica da linha envolvente, denominada de “método dos motivos”, que engloba os parâmetros ligados aos motivos do perfil, atualmente objeto da norma ISO 12085 [B3, W3].

Nesta norma, um **motivo** é definido como sendo uma porção do perfil primário compreendida entre os pontos mais elevados de dois picos locais do perfil, consecutivos ou não (ver figura 10.31). A identificação dos motivos, no perfil primário, é realizada através da aplicação de um algoritmo do tipo "reconhecimento de forma". De entre os principais parâmetros merece destaque:

a) A profundidade média dos motivos de rugosidade – ***R***

*R* é o valor médio aritmético das profundidades  $H_j$  dos motivos de rugosidade, no interior do comprimento de avaliação (ver figura 10.31), ou seja:

$$R = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_j \quad (10.8)$$

em que ***m*** é o número de valores  $H_j$ . Nota: o número de valores  $H_j$  é o dobro do número de valores  $AR_i$  (comprimentos dos motivos de rugosidade) ( $m = 2n$ ).

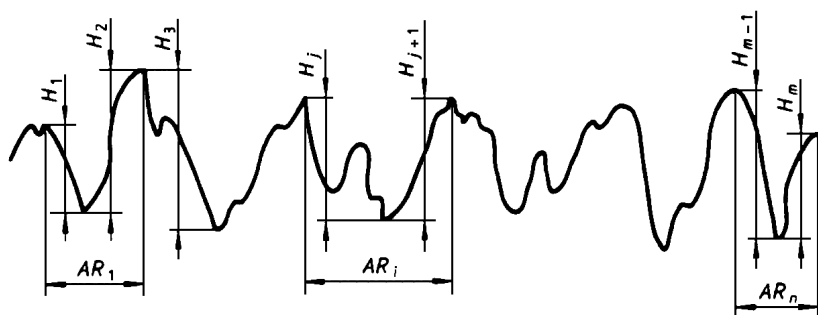


Figura 10.31 – Parâmetros de rugosidade ligados aos motivos de perfil (ISO 12085)

Os parâmetros ligados aos motivos podem ser calculados graficamente traçando a linha envolvente superior e a linha envolvente inferior, não descendo aos vales com passo inferior a 500  $\mu\text{m}$ . O parâmetro *R* representa a distância média entre as duas linhas envoltentes do perfil.

De acordo com Boulanger [B3], os parâmetros ligados aos motivos, agora reconhecidos pela ISO, permitem caracterizar a forma das irregularidades de superfície que influencia a função da peça, sendo esta forma que os gabinetes de estudos devem especificar com exatidão.

### 10.5.3 Parâmetros ligados à curva da taxa do comprimento de sustentação

As normas da série ISO 13565 definem diferentes parâmetros associados à curva da taxa do comprimento de sustentação ("*material ratio curve*"), também designada por curva de Abbott-Firestone.

A ISO 13565-2 descreve o processo de avaliação para a determinação de parâmetros relativos à representação linear da curva da taxa do comprimento de sustentação, que traduzem o aumento da taxa do comprimento de sustentação da superfície, em função da profundidade crescente do perfil de rugosidade. Estes parâmetros destinam-se a facilitar a avaliação do comportamento funcional das superfícies sujeitas a tensões mecânicas elevadas.

A ISO 13565-3 estabelece o processo de avaliação para permitir a determinação de parâmetros resultantes das regiões lineares da curva de probabilidade de matéria, que constitui a representação gaussiana da curva da taxa do comprimento de sustentação. Estes parâmetros destinam-se a facilitar a avaliação do comportamento tribológico, por exemplo, de superfícies com escorregamento lubrificadas, e para controlar o processo de fabricação.

- a) Parâmetros do perfil de rugosidade baseados na representação linear da curva da taxa do comprimento de sustentação (ISO 13565-2)

A linha reta equivalente, calculada com base na parte da região central da curva da taxa do comprimento de sustentação, inclui 40 % dos pontos medidos do perfil. Esta reta intersesta as abcissas  $Mr = 0\%$  e  $Mr = 100\%$ , das porções de matéria. A partir destes pontos, traçam-se duas linhas horizontais que ao intersetarem a curva permitem fazer a separação dos picos salientes e dos vales mais profundos [ver figura 10.32 b)]. As porções de matéria  $Mr_1$  e  $Mr_2$  delimitam o núcleo do perfil de rugosidade.

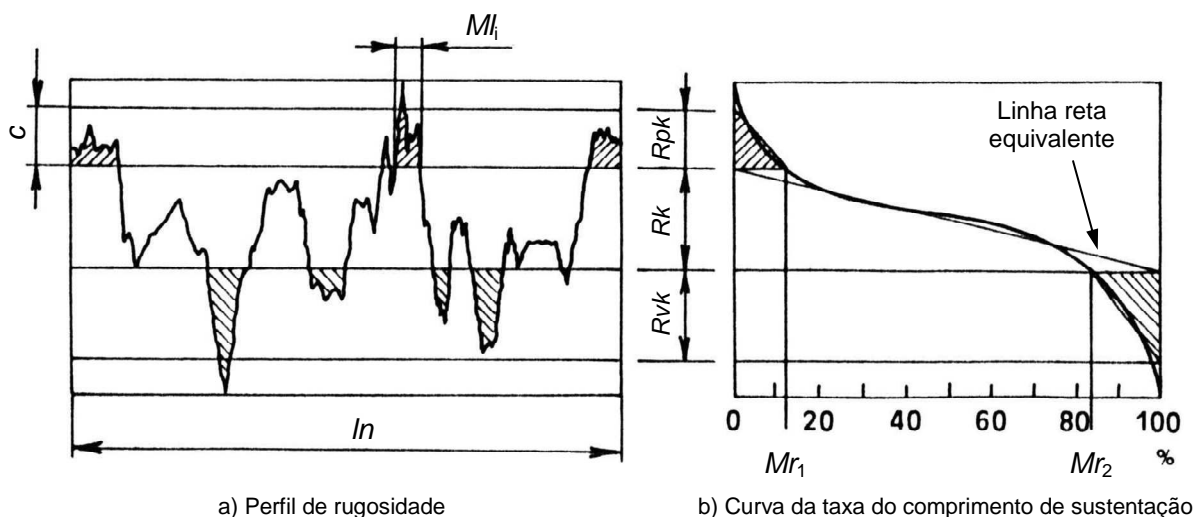


Figura 10.32 – Parâmetros do perfil de rugosidade baseados na representação linear da curva da taxa do comprimento de sustentação (curva de Abbott-Firestone) (ISO 13565-2)

A partir desta curva da taxa do comprimento de sustentação do perfil, pode definir-se, também, um conjunto de parâmetros (ISO 13565-2) que descrevem as características funcionais da rugosidade de superfície, relevantes em superfícies de contacto fortemente carregadas, merecendo particular referência:

- $Rk$  – profundidade do perfil reduzido (sem os picos salientes e os vales profundos);
- $Rpk$  – altura dos picos eliminados;
- $Rvk$  – profundidade dos vales eliminados.

Estes parâmetros permitem descrever a configuração da curva da taxa do comprimento de sustentação, através da subdivisão da profundidade total do perfil em três zonas:

- zona dos picos, ligada a comportamentos iniciais em serviço, tais como a rodagem e o desgaste;
- zona do perfil reduzido, ligada com a capacidade de carga, o comportamento funcional, etc.;
- zona dos vales, ligada à lubrificação, à retenção de óleo, etc.

Os parâmetros em conformidade com esta parte da ISO 13565-2 só deverão ser calculados se a curva da taxa do comprimento de sustentação tiver uma forma em “S”, conforme se mostra na figura 10.32 b), e, portanto com um único ponto de inflexão. A experiência mostra que tal se regista sempre em superfícies obtidas por rodagem, por retificação ou por “*honing*”.

A comparação entre curvas da taxa do comprimento de sustentação, de diferentes perfis de rugosidade, pode dar alguma indicação sobre como essas curvas podem ser utilizadas na estimativa da resistência relativa de uma dada superfície face a avarias. No entanto, a informação proporcionada pelos parâmetros da curva da taxa do comprimento de sustentação não está ainda suficientemente desenvolvida, para uso corrente, em muitos domínios técnicos, tais como, por exemplo, em rodas dentadas, para as quais, presentemente, ainda não estão disponíveis valores recomendados para este tipo de parâmetros (ISO/TR 10064-4).

## 10.6 A importância dos estados de superfície

A rugosidade das superfícies pode desempenhar um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, tendo influência em funcionalidades tais como [G1, M3, B3, S3, S4]:

- a lubrificação de mecanismos em regimes hidrodinâmico e elastohidrodinâmico;
- a qualidade da materialização dos ajustamentos com aperto;
- as estanquidades estática e dinâmica entre superfícies em contacto;
- a condução térmica e elétrica entre superfícies em contacto;
- a resistência oferecida pelas superfícies ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- a qualidade dos revestimentos (pintura) dos componentes;
- a qualidade da deposição eletrolítica;
- a aderência (colagem, etc.);
- a resistência à flexão e à fadiga de peças mecânicas;
- a resistência à corrosão e ao desgaste;
- a qualidade do atrito de escorregamento;
- a aparência (estética).

O estado de superfície dos corpos em contacto tem um papel determinante no funcionamento dos mecanismos lubrificados. A qualidade do seu funcionamento está diretamente relacionada com a pressão normal de contacto, com a temperatura, com o lubrificante e com a geometria (amplitude e comprimento de onda) das rugosidades e ondulações das superfícies [S2].

Genericamente, podem definir-se alguns parâmetros de comportamento do contacto muito importantes, para os mecanismos que funcionam em regime elastohidrodinâmico rugoso (EHDR), em função do estado de superfície dos maciços, [B2, H2, D2, M3, S1]:

- A espessura específica do filme lubrificante  $\lambda = h_{0c} / \sigma_c$ ; em que  $\sigma_c = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0.5}$  é o desvio quadrático composto de rugosidade,  $\sigma_i$  (R.M.S.) são os desvios médios quadráticos dos perfis de cada uma das superfícies em contacto e  $h_{0c}$  é a espessura corrigida do filme lubrificante no centro do contacto, calculada, por exemplo, a partir das equações deduzidas por Dowson e Toyoda [D1]. Os valores deste parâmetro,  $\lambda$ , são muito utilizados para caracterizar o tipo de regime de lubrificação registado (limite, misto ou EHD parcial; ou a filme completo ou EHD).
- A relação  $\sigma_1 / \sigma_2$  entre as rugosidades de cada uma das superfícies em contacto. Para dois corpos com a mesma matéria, esta relação deve ser aproximadamente igual a 1.0. Valores muito diferentes para as rugosidades  $\sigma_i$  (R.M.S.), de cada uma das superfícies, provocam uma má rodagem e um desgaste prematuro das superfícies. No entanto, para corpos de diferentes matérias, a superfície da matéria mais dura deve ter um valor de rugosidade menor do que o da superfície da matéria mais macia. Este procedimento tem em conta que a superfície mais dura não pode ser rodada pela superfície mais macia e evita que aquela desempenhe um papel muito abrasivo.
- A relação  $\beta_c / \sigma_c$ , entre o raio de curvatura médio dos picos de rugosidade  $\beta_c$  e o desvio quadrático composto  $\sigma_c$ , deve ser a maior possível.
- A relação entre a área de contacto real e a área de contacto aparente  $S / S_H$ . A área de contacto real resulta do somatório das áreas de todos os microcontactos estabelecidos, ao nível dos picos de rugosidade das superfícies. A área de contacto aparente, equivalente à área do contacto hertziano, é a área macroscópica tal qual é definida no contacto entre dois corpos elásticos perfeitos, com as mesmas geometrias dos corpos rugosos, e onde estão englobados todos os microcontactos.

Todos estes parâmetros traduzem duas ideias fundamentais. Por um lado, a área de sustentação deve ser a maior possível, para reduzir ao mínimo as pressões localizadas nas zonas de contacto efetivo. Por outro, a espessura do filme de lubrificante deve exceder a altura das rugosidades, a fim de garantir a separação dos maciços.

Os estados de superfície têm pois grande importância, nomeadamente durante o período de rodagem dos sistemas mecânicos. A função da peça e a escolha do modo de fabricação fazem com que haja, geralmente, uma relação estreita entre a qualidade das tolerâncias dimensionais e o estado das superfícies. A prescrição de um estado de superfície implica igualmente que os desvios de forma sejam mantidos dentro de limites admissíveis. Um estado de superfície não deve ser especificado se não for essencial para a função, a duração de vida ou, eventualmente, o aspeto do produto, pois especificações de valores anormalmente pequenos aumentam inutilmente o custo do processo (CNOMO GE40-084N).

A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade das rugosidades podem fornecer indicações sobre as causas que estão na sua origem, das quais se podem destacar, entre outras [G1, S3]:

- o próprio método de obtenção da peça (p. ex.: processos por arranque de apra em que as estrias e ranhuras derivam do avanço da aresta de corte da ferramenta ou do avanço, por volta, da peça ou da mó; processos de conformação a frio ou a quente que dão origem a relevos e crateras justapostos);
- o desgaste das ferramentas (qualidade da mó, qualidade do afiamento da ferramenta e da diamantagem da mó, por exemplo);
- a heterogeneidade e plasticidade da matéria trabalhada;
- as vibrações de altas frequências no sistema peça-ferramenta (resultantes de deficiências nos elementos das máquinas-ferramenta, e igualmente, na instalação do isolamento dinâmico passivo e ativo);
- o sistema de lubrificação com problemas (lubrificante inadequado, modo de irrigação, filtragem, etc.).

## 10.7 Algumas relações práticas entre diferentes parâmetros de rugosidade

Quando um fornecedor não possuir meios que permitam avaliar os parâmetros caracterizadores indicados num desenho, deverá, excecionalmente, negociar com os serviços competentes, caso a caso, a utilização de outros parâmetros alternativos (CNOMO GE40-084N).

Não existem bases teóricas nem resultados empíricos que sustentem quaisquer relações exatas entre a generalidade dos diferentes parâmetros de rugosidade, podendo encontrar-se, na literatura da especialidade, algumas relações práticas que seguidamente se indicam (ver quadro 10.4).

Quadro 10.4 – Algumas relações práticas entre diferentes parâmetros de rugosidade

Relações práticas entre parâmetros de rugosidade	Referências
$R_z$ (ISO 4287) $\approx 3$ a $4 R_a$	Norma NP I-976: 1969
$R_z$ (DIN) $\approx 4$ a $10 R_a$	Mummery, L. [M5, p. 94]
$R_z$ (DIN) = f ( $R_a$ ) e $R_a$ = f ( $R_z$ (DIN) )	Suplem. 1, to DIN 4768, Part 1:1978, (ver figura 10.33)
$R_z$ (ISO 468) $\approx 4$ a $5 R_a$	Recomendação FASA/RENAULT
$R_t \approx 5 R_a$ (para $R_a > 10 \mu m$ ) $R_t \approx 10 R_a$ (para $R_a < 1 \mu m$ )	Girard, J. [G1, p. 53]
$R_z \approx 3,2 R_a$ $R_p \approx 0,4 R$ $R_{max} \leq 2 R$	Chevalier A. [C2, p. 55]
$R \approx 4$ a $5 R_a$	Mémento da Afpa [M2]
$R \approx 5 R_a$ $R \approx 4 R_q$	Recomendação FASA/RENAULT
$R \approx 4 R_a$ (em dentes de rodas dentadas)	
$R \approx 0,64 R_z$	



Algumas das discrepâncias encontradas nas relações indicadas, no quadro 10.4, podem ter a ver com a época em que a recolha de dados foi efetuada. As medições mais antigas de parâmetros ligados à linha média eram efetuadas com perfilómetros de contacto por apalpador (rugosímetros) com filtros analógicos 2RC e as mais recentes utilizam filtros digitais gaussianos. De acordo com Whitehouse [W1], com a anterior tecnologia, os valores de parâmetros de valor médio,  $R_q$ , não eram afetados e os  $R_a$  sofriam modificações pouco significativas, de menos de 3 %. No entanto, alguns dos parâmetros de pico-vale podiam ser distorcidos, em particular apresentando valores superiores aos seus valores verdadeiros.

Na figura 10.33, apresenta-se um gráfico, proposto pelo DIN, que permite a conversão de parâmetros  $R_z$  em  $R_a$  e vice-versa, obtidos por meio de perfilómetros de contacto por apalpador, para utilização apenas em superfícies obtidas por corte com arranque de apara. A banda de dispersão, utilizada no gráfico, assegura a realização da operação de conversão com um fator de segurança adequado.

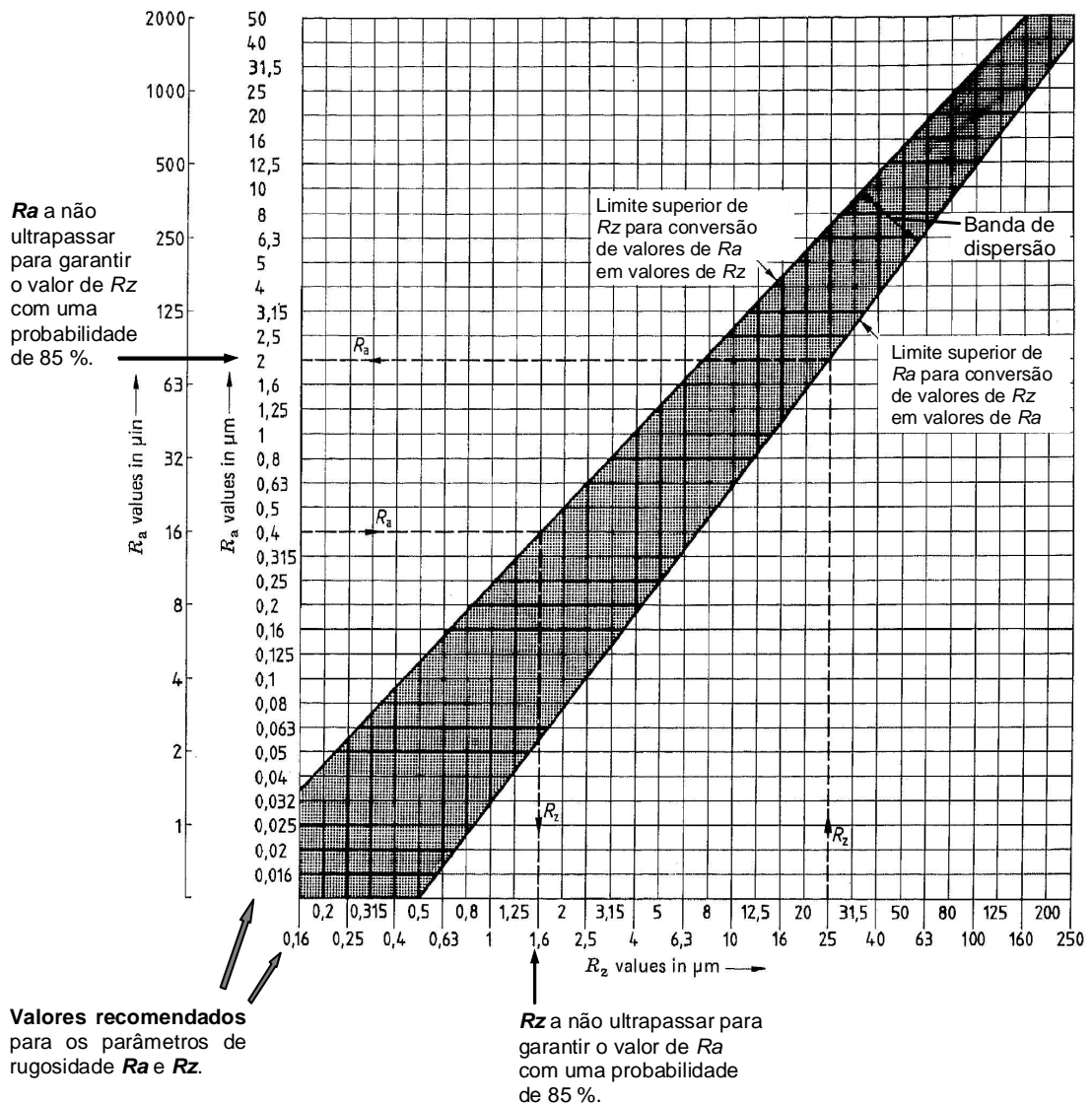


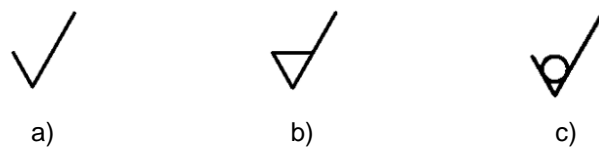
Figura 10.33 – Conversão de parâmetros  $R_z$  em  $R_a$  e vice-versa (gráfico do Suplemento 1, da norma DIN 4768 Parte 1)

## 10.8 Símbolos gráficos para as indicações dos estados de superfície

A norma ISO 1302 – “*Indication of surface texture in technical product documentation*” especifica as regras para a indicação dos estados de superfície, pelo método do perfil, em documentação técnica de produtos (desenhos, especificações, contratos, relatórios, etc.) por meio de símbolos gráficos e de indicações textuais, no âmbito do conceito GPS.

De acordo com a secção 10.2 deste texto, estes símbolos começaram a ser utilizados, na década de 60 do séc. XX, em substituição dos “velhos” símbolos dos triângulos (ver figura 10.4), quando os estados de superfície passaram a ser especificados através da indicação de valores dos seus parâmetros caracterizadores, passíveis de serem verificados por meio de instrumentos de medição mais acessíveis. A atual norma ISO 1302 foi publicada pela primeira vez em 1971, sob a forma de recomendação (ISO/R 1302).

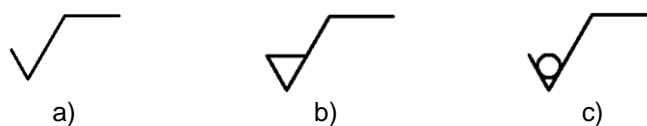
Os requisitos para os estados de superfície são indicados na documentação técnica de produtos através de diferentes variantes de símbolos gráficos, cada uma delas tendo o seu significado próprio, conforme se indica nas figuras 10.34 e 10.35.



- a) O **símbolo de base** consiste em duas linhas retas de comprimento desigual, inclinadas, aproximadamente, a 60° em relação à linha que representa a superfície considerada. Não deverá ser utilizado isoladamente, sem informações complementares. Deve ser utilizado para proporcionar indicações coletivas [ver figuras 10.54 a) e 10.56 a)].
- b) O **símbolo prolongado**, com a adição de uma barra horizontal, indica o requisito de remoção de matéria (p. ex. corte por arranque de apara) para a obtenção da superfície especificada. Não deverá ser utilizado isoladamente, sem informações complementares. Deve ser utilizado para proporcionar indicações coletivas [ver figura 10.56 b)].
- c) O **símbolo prolongado**, com a adição de uma circunferência, indica a interdição de remoção de matéria para a obtenção da superfície especificada. Não deverá ser utilizado isoladamente, sem informações complementares. Quando utilizado num desenho relativo a um dado processo de fabricação, a sua interpretação deve ser a seguinte: “a superfície especificada deve ser deixada no estado resultante de um processo de fabricação anterior, tenha sido essa condição obtida por remoção de matéria, ou por outros meios” [ver figura 10.56 c)].

Figura 10.34 – Símbolos gráficos de base e prolongados (ISO 1302)

Quando há necessidade de indicar requisitos complementares para as características dos estado das superfícies, devem ser utilizados símbolos gráficos completos, ver figura 10.35.



- a) O **símbolo completo** que permite qualquer processo de fabricação.
- b) O **símbolo completo** que indica a obrigatoriedade de remoção de matéria.
- c) O **símbolo completo** que indica a a interdição de remoção de matéria.

Figura 10.35 – Símbolos gráficos completos. Adaptada da ISO 1302

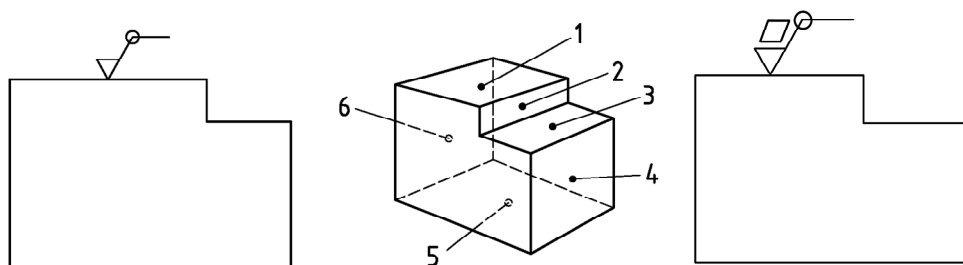
Para utilização em textos escritos (p. ex. relatórios ou contratos), a indicação de textos correspondentes às figuras 10.35 é: a) **APA** (“*Any process allowed*”), b) **MRR** (“*Material removal required*”) e c) **NMR** (“*No material removed*”).

As regras e a simbologia, especificadas na norma ISO 1302, para as indicações dos estados de superfície são fundamentalmente dirigidas à indicação de requisitos de superfícies por intermédio de parâmetros obtidos pelo método de avaliação do perfil. Com o início da normalização dos métodos de medição tridimensionais (de superfície), a norma ISO 25178-1 indica os símbolos, representados na figura 10.36, para ilustrar situações equivalentes às atrás descritas para o método do perfil.



Figura 10.36 – Símbolos gráficos para estados de superfície (“areal”). Adaptada da ISO 25178-1

Complementarmente, quando se requer o mesmo requisito do estado de superfície para “todas as superfícies em volta de um contorno da peça”, deve utilizar-se o símbolo gráfico indicado na figura 10.37:



Nota: O contorno no desenho representa as seis superfícies mostradas na representação 3D da peça (as superfícies frontal e traseira não estão incluídas).

a) Método de avaliação do perfil

b) Método de avaliação da superfície

Figura 10.37 – Requisito do estado de superfície para todas as seis superfícies representadas pelo contorno da peça. Adaptada das normas ISO 1302 e ISO 25178-1

## 10.9 Composição do símbolo gráfico completo para os estados de superfície

No domínio dos estados de superfície, tem sido sempre usual definir cada parâmetro de superfície em função do instrumento utilizado na sua medição e dos algoritmos e ajustes desse instrumento, uma vez que o estado de superfície não tem qualquer parâmetro “natural”, do tipo “diâmetro de um furo”. A ideia de representar uma medição em termos de uma série de operações e de definir uma especificação como uma “prescrição” para uma medição foi expressa, pela primeira vez, pelo então ISO/TC 57 – “*Metrology and properties of surfaces*”. Na antiga norma ISO 4287-2:1984, o termo “operador ideal” era utilizado para descrever o instrumento, o algoritmo, os ajustes e o procedimento de medição que forneceriam o valor correto, em conformidade com a definição do parâmetro do estado de superfície.

A definição de uma especificação geométrica como um conjunto ordenado de operações (designado de **operador**), que pode ser considerado como uma instrução virtual de medição, em que cada operação e os seus parâmetros definidores são passos do processo de medição, preconizada na nova linguagem GPS e já abordada no capítulo 4 deste trabalho, é portanto um desenvolvimento estruturado de uma prática tradicional no domínio dos estados de superfície [N1].

Assim, de acordo com a norma ISO 1302, para que um requisito do estado de superfície, indicado num documento técnico de produto, seja inequívoco, poderá ser necessário especificar, para além do respetivo parâmetro e do seu valor numérico, requisitos adicionais tais como: a banda de transmissão ou o comprimento de base, o processo de fabricação, a orientação das estrias de superfície, e possíveis sobre-espessuras para trabalho mecânico (ver figura 10.38). Poderá também ser necessário estabelecer vários parâmetros diferentes do estado de superfície, de modo que os requisitos especificados assegurem propriedades funcionais inequívocas da superfície.

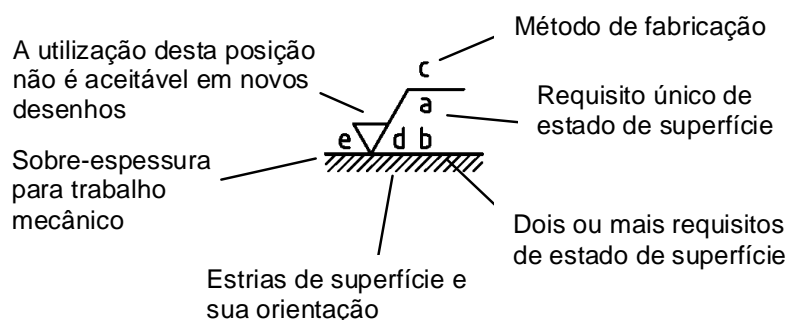


Figura 10.38 – Posições para a localização de requisitos complementares. Adaptada da ISO 1302

As posições a) a e) dos requisitos complementares de estados de superfície, indicadas na figura 10.38, são as seguintes:

- a) **Requisito único de estado de superfície** – indica a designação do parâmetro de estado de superfície (“*surface texture parameter*”) e o seu valor numérico (em  $\mu\text{m}$ ), antecedida da banda de transmissão/comprimento de base (“*transmission band/sampling length*”),  $l_r$  (em  $\text{mm}$ ),

referidos na secção 10.10.3 deste texto. Deve ser inserido um espaço duplo em branco entre a designação do parâmetro e o seu valor limite.

Exemplos:

- 0,0025-0,8/Rz 6,8 (com a indicação da banda de transmissão),  
 -0,8/Rz 6,8 (apenas com a indicação do comprimento de base, *lr*),  
 0,008-0,5/16/R 10 (com a indicação, entre barras inclinadas, do comprimento de avaliação, no método dos motivos).

Geralmente, a banda de transmissão é o intervalo de comprimentos de onda entre dois filtros definidos (ver ISO 3274 e ISO 11562) e, para o método dos motivos, é o intervalo de comprimentos de onda entre dois limites definidos (ver ISO 12085).

- b) **Dois ou mais requisitos de estado de superfície** – O segundo requisito deve ser indicado na posição b). Se tiverem de ser indicados três ou mais requisitos, o símbolo gráfico é aumentado, em conformidade, na vertical.
- c) **Método de fabricação** – indica o método de fabricação ("*manufacturing method*"), o tratamento, os revestimentos ou outros requisitos que dizem respeito ao processo de fabricação, etc. para produzir a superfície, por exemplo, torneada, retificada, galvanizada (ver também a secção 10.11).
- d) **Estrias de superfície e sua orientação** – indica as estrias de superfície e sua orientação ("*surface lay and the orientation*") resultante do processo de fabricação utilizado e que melhor satisfaz o comportamento funcional pretendido, através da inscrição do símbolo apropriado "=", "X", "M", etc. (ver secção 10.12).
- e) **Sobre-espessura para trabalho mecânico** – se necessária, a sobre-espessura para trabalho mecânico ("*machining allowance*") deve ser indicada através de um valor numérico em milímetros (mm).

O símbolo gráfico completo para a especificação de estados de superfície a avaliar por meio de métodos de medição tridimensionais (de superfície), em conformidade com a norma ISO 25178-1, está representado na figura 10.39.

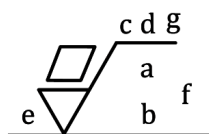


Figura 10.39 – Posições para a localização de requisitos complementares no símbolo gráfico completo para estados de superfície ("*areal*") (ISO 25178-1)

As posições de a) a e) para a localização de requisitos correspondem às indicadas na figura 10.38, relativas aos estados de superfície a avaliar pelo método do perfil. As posições f) e g) permitem a indicação de um ou dois planos de interseção que devem ser utilizados para identificar, respetivamente, a orientação da área de avaliação e a orientação das estrias de superfície. Em casos

normais, estes planos coincidem num só plano que deve ser utilizado em anotação 3D, quando o plano de projeção estiver implicado no significado da especificação em desenho 2D. No entanto, uma especificação de estado de superfície (“*areal*”) pode necessitar de uma referência a dois planos de interseção separados (ver figura 10.40).

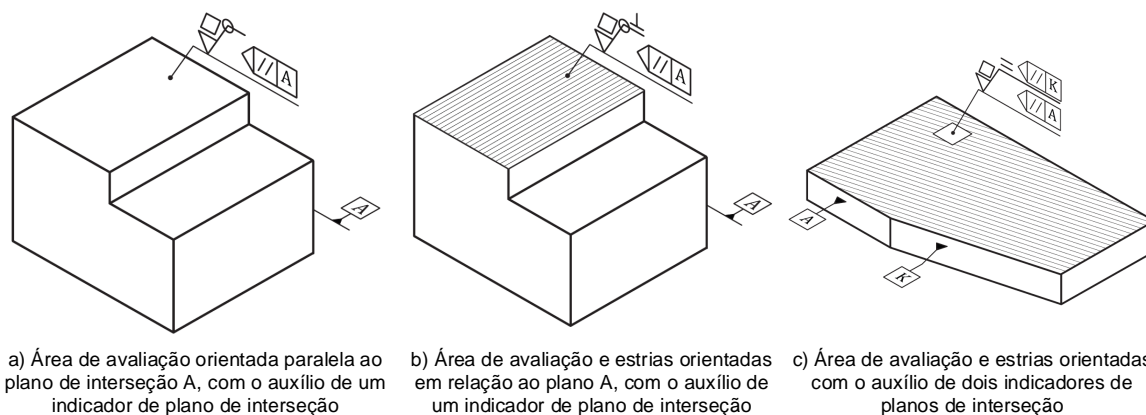


Figura 10.40 – Exemplos de especificação de área de avaliação e estrias de superfície orientadas através de indicadores de planos de interseção. Adaptada da ISO 25178-1

## 10.10 Indicações das designações dos parâmetros de estados de superfície

A designação do parâmetro e o valor numérico associado, a indicar, incluem quatro elementos de informação essenciais para a interpretação do requisito especificado:

- Qual dos três perfis da superfície (*R*, *W* ou *P*) foi indicado?
- Qual a característica (parâmetro) do perfil que foi indicada?
- Quantos comprimentos de base, *l<sub>r</sub>*, compõem o comprimento de avaliação, *l<sub>n</sub>*?
- Como deve ser interpretado o limite da especificação indicado?

### 10.10.1 Indicação do comprimento de avaliação, *l<sub>n</sub>*

O comprimento de avaliação (“*evaluation length*”), *l<sub>n</sub>*, é o comprimento, na direção da linha média (eixo dos *XX*), utilizado para o estabelecimento do perfil a avaliar. Este comprimento pode corresponder a um ou a vários comprimentos de base.

#### 10.10.1.1 Parâmetros de perfil (ISO 4287)

- Perfil *R*

Em conformidade com a norma ISO 4288, por omissão, ***l<sub>n</sub> = 5 x l<sub>r</sub>***, sendo os parâmetros referidos pelas suas designações de base, (p. ex.: *R<sub>z</sub>*, *R<sub>a</sub>*, *R<sub>p</sub>*, etc.). Se o comprimento, *l<sub>n</sub>*, for diferente de 5 *l<sub>r</sub>*, por exemplo, *l<sub>n</sub> = 3 x l<sub>r</sub>*, tal indicação deve ser acrescentada à designação de base do parâmetro, p. ex.: *R<sub>z</sub>3*, *R<sub>a</sub>3*, *R<sub>p</sub>3*, etc.

– Perfil *W*

Não existem valores de comprimentos, *ln*, por omissão, normalizados. Logo, o número de comprimentos de base deve ser sempre indicado, por exemplo, *Wz5*, *Wa3*.

– Perfil *P*

O comprimento de avaliação, *ln*, por omissão, é definido, na ISO 4288, como o comprimento total do elemento a medir. Logo, a indicação do número de comprimentos de base não é relevante.

### 10.10.1.2 Parâmetros ligados aos motivos do perfil (ISO 12085)

Por omissão, o comprimento de avaliação, *ln*, é igual a 16 mm. Se *ln* diferir deste valor, deve ser indicado entre duas barras oblíquas (p. ex.: 0,008-0,5/12/R 10). No entanto, uma vez que, neste âmbito, o conceito de *lr* não existe, a indicação do número de comprimentos de base, na designação do parâmetro, não é relevante.

### 10.10.1.3 Parâmetros baseados na curva da taxa do comprimento de sustentação (ISO 13565-2 e ISO 13565-3)

– Perfis *R* e *P*

Utilizam-se procedimentos idênticos aos utilizados para os parâmetros de perfil (ISO 4287). Para parâmetros de perfil *R*, baseados na curva da taxa do comprimento de sustentação linear, em concordância com as normas ISO 13565-2 e ISO 12085, a indicação do comprimento, *ln*, deve ser feita de acordo com a secção 10.10.1.2.

## 10.10.2 Indicação de limites de tolerância

Existem dois modos diferentes de indicar e interpretar a especificação dos limites de estados de superfície:

- a regra dos 16 % (regra por omissão), ver exemplo na figura 10.41;
- a regra do valor máximo, ver exemplo na figura 10.42.

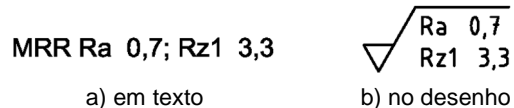


Figura 10.41 – Indicação de parâmetros, quando se aplica a regra dos 16 % (com banda de transmissão, por omissão) (ISO 1302)

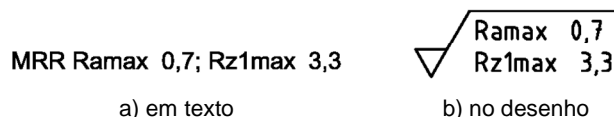


Figura 10.42 – Indicação de parâmetros, quando se aplica a regra do valor máximo (com banda de transmissão, por omissão) (ISO 1302)

**Na regra dos 16 %**, para requisitos especificados pelo limite superior de um parâmetro, a superfície é considerada aceitável se, no máximo, 16 % de todos os valores medidos do parâmetro considerado, baseados num comprimento de avaliação, ultrapassarem o valor indicado nos desenhos ou na documentação técnica de produtos.

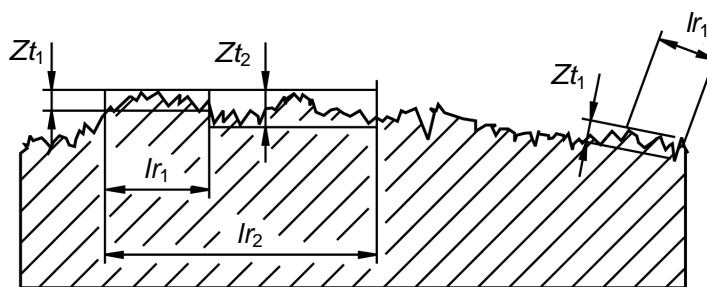
**Na regra do valor máximo**, nenhum dos valores medidos do parâmetro de rugosidade, em toda a superfície a controlar, deve exceder o valor especificado nos desenhos ou na documentação técnica de produtos.

Os parâmetros ligados aos motivos do perfil são definidos, apenas, segundo a regra dos 16 %.

Em termos de regras e processos para a avaliação dos estado de superfície pelo método do perfil (ISO 4288:1996), ver também a secção 10.19 deste texto.

### 10.10.3 Indicação da banda de transmissão e do comprimento de base

Geralmente, o estado de superfície é definido numa **banda de transmissão** (“*transmission band*”) – o intervalo de comprimentos de onda entre dois filtros definidos (ver ISO 3274) ou entre dois limites, no caso do método dos motivos (ISO 12085). A banda de transmissão é limitada por um filtro que corta os pequenos comprimentos de onda (**filtro de onda-curta**), isto é, que deixa passar as baixas frequências (**filtro passa-baixo**), e por outro que corta os comprimentos de onda longos (**filtro de onda-longa**), isto é, que deixa passar as altas frequências (**filtro passa-alto**). O valor de corte do filtro de onda-longa (“*cut-off value of the long-wave filter*”) ou filtro passa-alto (“*filtre passe-haut*”) é também designado por **comprimento de base** (“*sampling length*”),  $l_r$ , (ver figura 10.43).



A altura do elemento de perfil  $Z_{t2}$  é maior, pois  $l_{r2}$  incorpora a ondulação.  
A altura do elemento de perfil  $Z_{t1}$  é menor, pois, como  $l_{r1}$  é menor, ele filtra a ondulação.

Figura 10.43 – Rugosidade e ondulação [S3]

Se não for indicada qualquer banda de transmissão, em ligação com a designação do parâmetro, aplica-se a banda de transmissão por omissão ao requisito de estado de superfície (ver a secção 10.18 deste texto, e as normas ISO 4288, secção 7, e ISO 3274, secção 4.4). Certos parâmetros de estado de superfície não têm uma banda de transmissão definida, por omissão, um filtro de onda-curta, por omissão, ou um comprimento de base (filtro de onda-longa), por omissão. Logo, a



indicação do estado de superfície deve especificar a banda de transmissão, o filtro de onda-curta ou o filtro de onda-longa, para assegurar que o requisito indicado não é ambíguo, ver exemplo na figura 10.44.

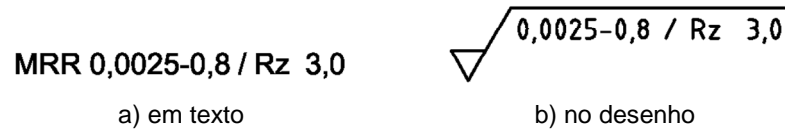


Figura 10.44 – Indicação da banda de transmissão, em ligação com o requisito de estado de superfície (ISO 1302)

O **comprimento de base,  $l_r$** , desempenha dois papéis. Um é abarcar uma quantidade suficiente de superfície que assegure a obtenção de um valor fiável do parâmetro de rugosidade, qualquer que ele seja. O outro é permitir a exclusão da ondulação (a componente de onda-longa da superfície resultante de problemas derivados da máquina-ferramenta) assegurando a medição apenas das marcas resultantes do processo de fabricação – a rugosidade. Os valores nominais do comprimento de base devem ser obtidos a partir da série (ver ISO 3274):

... mm; 0,08 mm; 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm; 8,0 mm; ... mm

Whitehouse [W3] lembra que a noção de comprimento de base nasceu na Rolls Royce, em 1940-41, a partir da consideração do torneamento como o processo de fabricação mais comum. Partindo de um valor médio das marcas de avanço, visíveis nas superfícies, de cerca de 0,003" e considerando que cada valor de  $l_r$  deveria incluir, pelo menos, 10 marcas, R. E. Reason, da Taylor & Hobson, chegou ao primeiro comprimento de base  $l_r \approx 0,8$  mm.

Em certos casos, poderá ser relevante indicar apenas um dos dois filtros da banda de transmissão, tal como, por exemplo, 0,008- (indicação apenas do filtro de onda-curta) ou -0,25 (indicação apenas do filtro de onda-longa). O segundo filtro, se existir, terá então o seu valor por omissão.

A banda de transmissão para o **perfil  $W$**  deve ser sempre indicada através de ambos os valores de corte, de modo a assegurar-se um requisito inequívoco. Esta banda poderá ser indicada baseada no valor de corte  $\lambda_c$ , por omissão, para a rugosidade da superfície, em conformidade com a ISO 4288, para a mesma superfície, através da expressão  $\lambda_c - n \times \lambda_c$ , em que o número  $n$  é escolhido pelo projetista, ver exemplo na figura 10.45.



Figura 10.45 – Banda de transmissão para a ondulação baseada no valor de corte  $\lambda_c$ , por omissão, para a rugosidade de superfície (ISO 1302)

#### 10.10.4 Tipos de tolerância – Unilateral ou bilateral

Quando a designação do parâmetro, o seu valor e a banda de transmissão são indicados, o valor do parâmetro em questão deve ser interpretado, por omissão, como sendo um limite superior de tolerância unilateral (de acordo com a “regra dos 16 %” ou com a “regra do valor máximo”). Se o parâmetro tiver de ser interpretado como sendo um limite inferior de tolerância unilateral, a designação do parâmetro deve ser precedida pela letra *L* (p. ex. *L Ra 0,32*). No caso de ser necessária uma especificação bilateral, as letras *U* e *L* devem anteceder os respectivos requisitos, ver exemplo na figura 10.46.

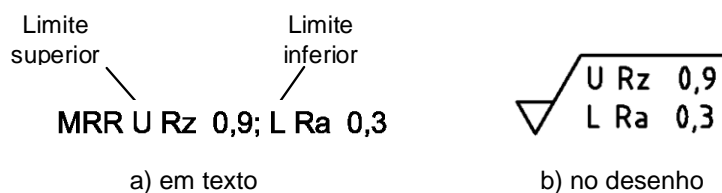


Figura 10.46 – Especificação bilateral da superfície (ISO 1302)

Por vezes, por razões funcionais, há uma necessidade de se especificar um limite inferior para o valor de uma característica de rugosidade. Por volta de 1930, já havia a consciência de que uma superfície muito lisa não significava necessariamente uma boa superfície do ponto de vista funcional. Em 1926, no Reino Unido, o departamento de competição da Bentley já tinha verificado que os seus motores produzidos internamente, com elevados padrões de tolerância e de rugosidade, tinham um desempenho pior do que o registado em motores adquiridos em fornecedores exteriores menos qualificados. Atualmente, sabe-se que esta insuficiência no desempenho esperado era devida ao facto das superfícies dos cilindros dos motores serem demasiado lisas para reterem adequadamente o óleo lubrificante, tornando-se mais propensas à gripagem, em regimes de elevada velocidade [W2].

#### 10.11 Indicação do método de fabricação ou de informação correlacionada

O valor do parâmetro do estado de superfície de uma superfície real é fortemente influenciado pela forma detalhada da curva do perfil. Consequentemente, na maioria dos casos, é necessário especificar qual o processo de fabricação a utilizar, pois este vai dar origem a uma dada forma detalhada da curva do perfil resultante, ver exemplos nas figuras 10.47 e 10.48.

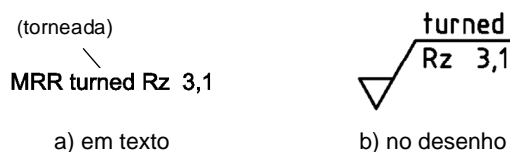


Figura 10.47 – Indicação de processo de corte por arranque de apara e do requisito para a rugosidade da superfície resultante (ISO 1302)

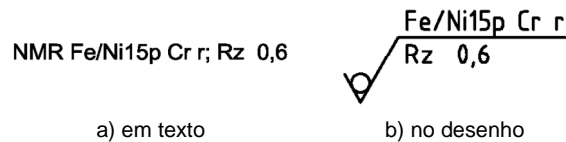


Figura 10.48 – Indicação do tipo de revestimento e do requisito de rugosidade da superfície resultante (ISO 1302)

## 10.12 Indicação das estrias de superfície

As estrias de superfície e a sua orientação resultante do processo de fabricação (traços deixados pelas ferramentas de corte) poderão ser indicadas, no símbolo gráfico relativo aos estados de superfície, através da inscrição dos símbolos apresentados no quadro 10.5 e de acordo com o exemplo da figura 10.49. A orientação das estrias é a orientação das irregularidades predominantes que, em geral, resultam do processo de fabricação utilizado.

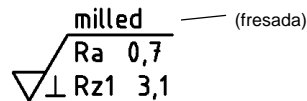


Figura 10.49 – Orientação das estrias de superfície indicada como sendo perpendicular ao plano de desenho (ISO 1302)

Quadro 10.5 – Indicação das estrias de superfície (ISO 1302)

Símbolo Gráfico	Interpretação e exemplo	
=	Paralelas ao plano de projeção da vista na qual o símbolo é utilizado	
⊥	Perpendiculares ao plano de projeção da vista na qual o símbolo é utilizado	
X	Cruzadas em duas direções oblíquas relativamente ao plano de projeção da vista na qual o símbolo é utilizado	
M	Multidirecionais	
C	Aproximadamente circulares relativamente ao centro da superfície à qual o símbolo se aplica	
R	Aproximadamente radiais relativamente ao centro da superfície à qual o símbolo se aplica	
P	Estrias particulares, não-direcionais, ou protuberantes	
Se for necessário especificar irregularidades de superfície que não são claramente definidas por um destes símbolos, tal deve ser indicado pela adição de uma nota adequada no desenho.		

Em termos do comportamento funcional das superfícies, o tipo e a orientação das suas estrias podem ter um papel importante nos contactos lubrificados do tipo rugoso entre corpos de mecanismos que funcionam em regime elastohidrodinâmico. Johnson e Greenwood [J1, G2], por exemplo, desenvolveram uma teoria que sugere que uma orientação transversal da rugosidade das superfícies, relativamente à direção do fluxo do lubrificante, conduz a uma espessura média do filme lubrificante superior à espessura verificada entre superfícies perfeitas equivalentes, enquanto uma orientação longitudinal das rugosidades produz uma espessura média do filme lubrificante inferior. No entanto, concluíram também que, pelo menos para valores pequenos da espessura específica do filme lubrificante,  $\lambda$ , e estados de superfície de aplicação prática, a espessura média do filme lubrificante no centro do contacto pode ser levemente superior ou inferior a  $h_0$ . Presentemente, não se conhecem aproximações consistentes que permitam contemplar o efeito da rugosidade, em termos gerais, pelo que, as considerações anteriores devem ser entendidas apenas como um indicador de probabilidade.

Por sua vez, os cilindros dos motores de combustão interna são tradicionalmente acabados por um tipo de processo mecânico (“*honing*” ou rodagem por meio de ferramenta diamantada) que deixa traços cruzados fazendo um ângulo  $\alpha$  entre  $120^\circ$  e  $150^\circ$  entre si. Com vista a reduzir a duração da operação de “*honing*” e a aumentar o volume de óleo retido pelas estrias resultantes, modernamente usam-se superfícies multiprocessos, tais como as superfícies “*plateau honing*” dos cilindros, em que a zona superior da curva caracteriza a capacidade de carga do perfil da superfície e a zona inferior a sua capacidade de retenção de lubrificante [A2, W3].

### 10.13 Indicação da sobre-espessura para trabalho mecânico

A sobre-espessura para trabalho mecânico é geralmente indicada apenas nos casos em que dois ou mais estádios do processo são mostrados no mesmo desenho (ver também a secção 9.4.5 deste trabalho). As sobre-espessuras para trabalho mecânico podem assim ser encontradas, por exemplo, em desenhos de peças fundidas em bruto ou estampadas, com a peça final traçada na peça em bruto (ver figura 10.50).

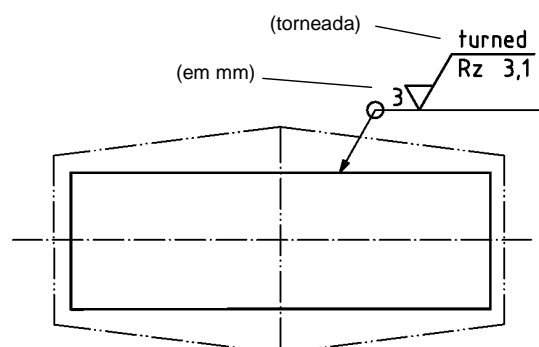


Figura 10.50 – Indicação de requisitos de estado de superfície para a peça “final” (incluindo um requisito de 3 mm de sobre-espessura para todas as superfícies) (ISO 1302)

## 10.14 Indicações dos estados de superfície nos desenhos e noutra documentação técnica de produtos

Os requisitos para os estados de superfície devem ser indicados apenas uma vez para uma dada superfície e, se possível, na mesma vista em que o tamanho e/ou a posição são indicados e toleranciados. Salvo indicação em contrário, estes requisitos são aplicáveis após a respetiva operação de trabalho mecânico, revestimento, etc. (ver exemplos nas figuras 10.51 a 10.57).

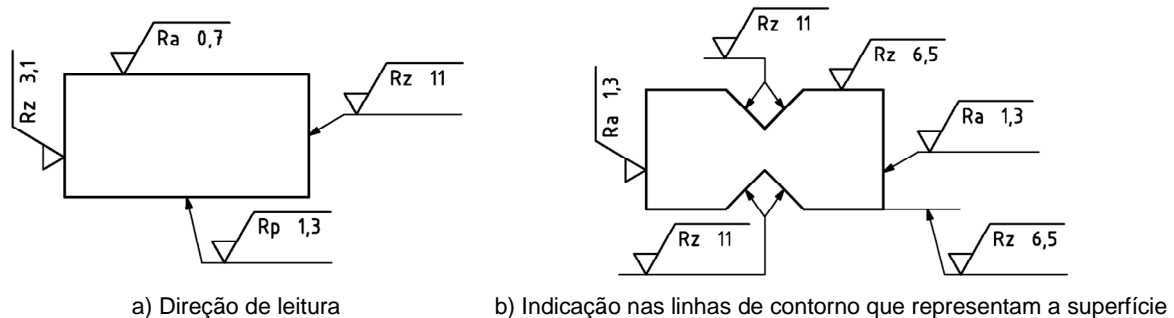


Figura 10.51 – Indicação de requisitos dos estados de superfície. Adaptada da ISO 1302

Como regra geral, o símbolo gráfico, ou a linha de indicação que termina com uma seta, deve apontar para a superfície, a partir do lado exterior da matéria da peça, quer para o contorno que representa a superfície quer para a sua extensão (ver figuras 10.52).

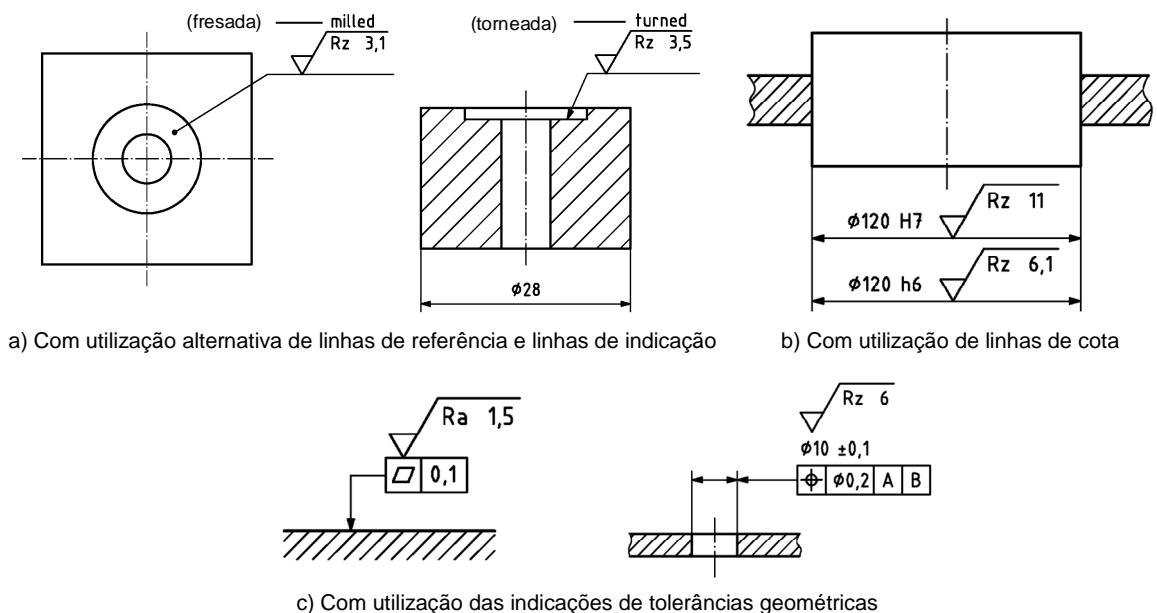


Figura 10.52 – Indicação de requisitos dos estados de superfície. Adaptada da ISO 1302

As superfícies cilíndricas ou prismáticas poderão ser especificadas apenas uma vez, se indicadas por meio de uma linha de eixo e se cada face da superfície prismática tiver o mesmo requisito de estado de superfície (ver figuras 10.53). Na figura 10.53 b), as faces do elemento prismático têm requisitos diferentes.

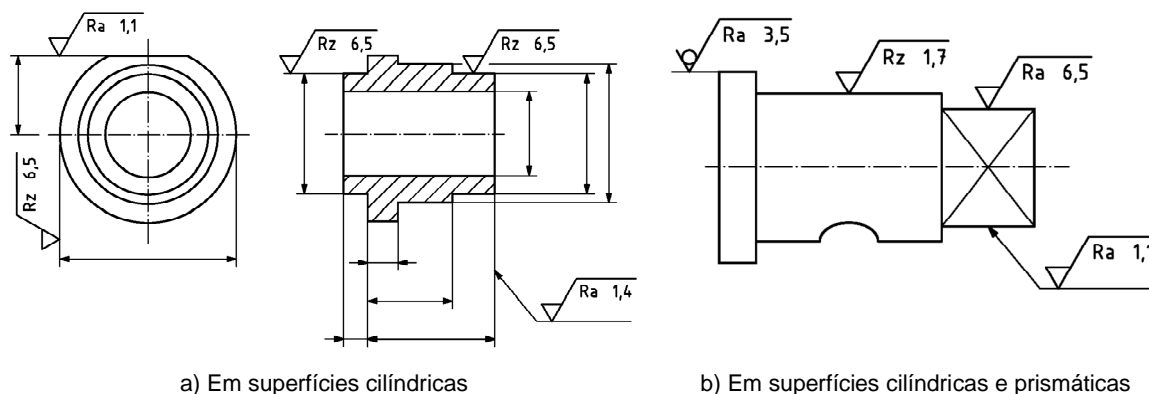


Figura 10.53 – Indicação de requisitos dos estados de superfície. Adaptada da ISO 1302

Se, na maioria das superfícies de uma peça, for requerido um mesmo estado de superfície, este deverá ser colocado junto da legenda do desenho. O símbolo gráfico geral deve ser seguido de um símbolo de base entre parêntesis, sem qualquer outra indicação [ver figura 10.54 a)] ou, em alternativa, dos requisitos especiais diferentes, inscritos no desenho, entre parêntesis [ver figura 10.54 b)].

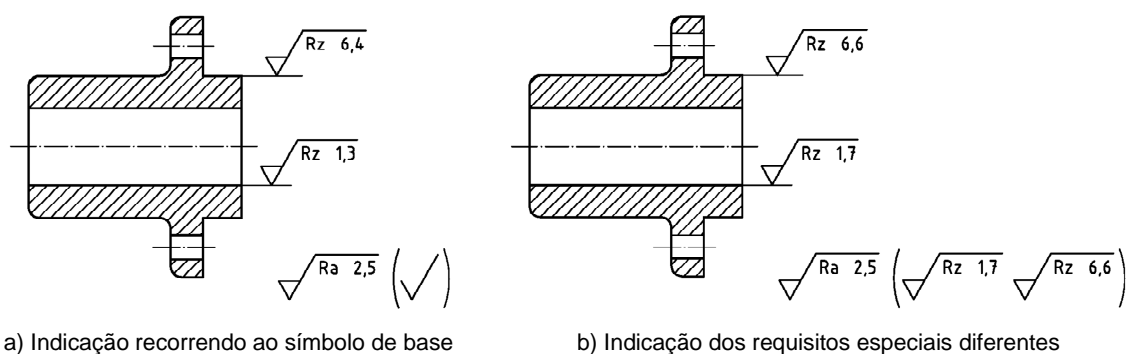


Figura 10.54 – Indicação simplificada – Maioria das superfícies com o mesmo estado de superfície requerido. Adaptada da ISO 1302

Para evitar a repetição de indicações complexas, poder-se-á utilizar uma indicação de referência simplificada, desde que o seu significado esteja explicado junto ou no interior da legenda (ver figura 10.55).

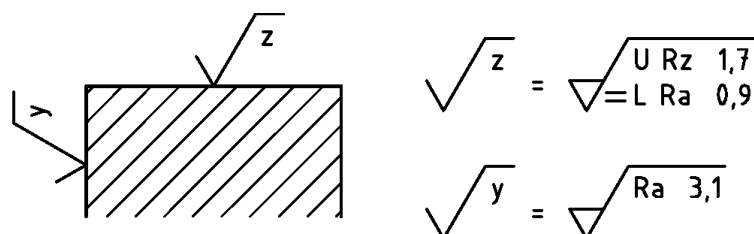


Figura 10.55 – Indicação de referência no caso do espaço no desenho ser limitado (ISO 1302)

Os correspondentes símbolos gráficos da figura 10.34 poderão ser utilizados na superfície apropriada e o seu significado indicado no desenho, tal como se mostra na figura 10.56.

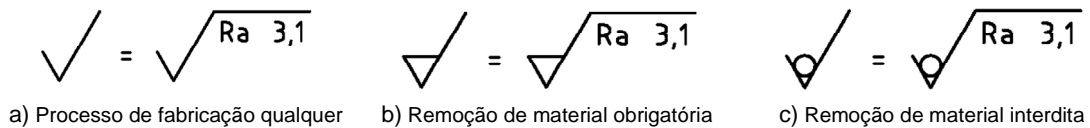


Figura 10.56 – Indicação simplificada de requisitos de estados de superfície (ISO 1302)

Se for necessário definir, em simultâneo, a indicação dos estados de superfície antes e após o tratamento, tal deve ser indicado em conformidade com a figura 10.57.

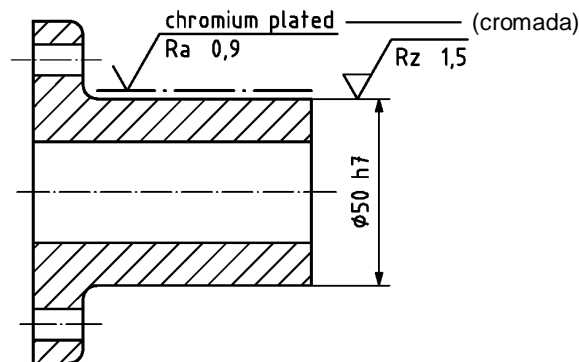


Figura 10.57 – Indicação de requisitos de estado de superfície antes e após tratamento (neste caso, revestimento), com utilização de uma linha a traço longo-ponto grosso (ISO 1302)

## 10.15 Indicações mínimas para um controlo inequívoco das funções da superfície

A especificação de um requisito do estado de superfície, adequado à função desempenhada pela superfície de uma peça, deve ser construída, com uma incerteza pequena, a partir de vários elementos de controlo diferentes, que podem ser parte da indicação no desenho ou da indicação em texto, dada noutros documentos (ver figura 10.58).

Segundo a ISO 1302, a experiência tem mostrado que todos estes elementos são necessários para a formação de uma relação inequívoca entre o requisito do estado de superfície e a função da superfície. Apenas em muito poucos casos, alguns dos elementos podem ser omissos num requisito que se queira inequívoco (isto é, **com uma ambiguidade de especificação pequena**). A maioria dos elementos é também necessária para ajustar o instrumento de medição [b), c), d), e), f)]. Os restantes são necessários para avaliar, de uma forma inequívoca, o resultado da medição e para fazer a sua comparação com o limite ou limites requeridos.

A nova linguagem GPS tem permitido avanços importantes neste domínio, mas a sua aceitação e aplicação na indústria, sobretudo nas pequenas e médias empresas que dispõem de poucos recursos para efetuarem a sua interpretação e implementação de um modo correto, tem sido polémica, uma vez que é considerada muito teórica, abstrata, complexa e complicada [Y1].

Com vista a permitir simplificar a indicação dos requisitos do estado de superfície, mantendo uma relação inequívoca entre a indicação no desenho e a função da superfície, a ISO definiu também um número de condições por omissão ("*by default*"). Estas condições aplicam-se sempre que o desenho não inclua qualquer indicação em contrário. Logo, as condições por omissão dão origem a indicações mais simples dos estados de superfície. No entanto, o princípio respeitante às condições por omissão ainda não abrange todos os parâmetros. As normas ISO 1302, ISO 3274, ISO 4287 e ISO 4288 contêm informações sobre as condições por omissão atualmente existentes.

Assim, por exemplo, a indicação do requisito de estado de superfície "MRR Ra 3,2", num documento textual, deve ser interpretada, com base nas condições por omissão, como sendo:

"MRR U "gaussiano" 0,008-2,5 / Ra5 16 % 3,2"

isto é:

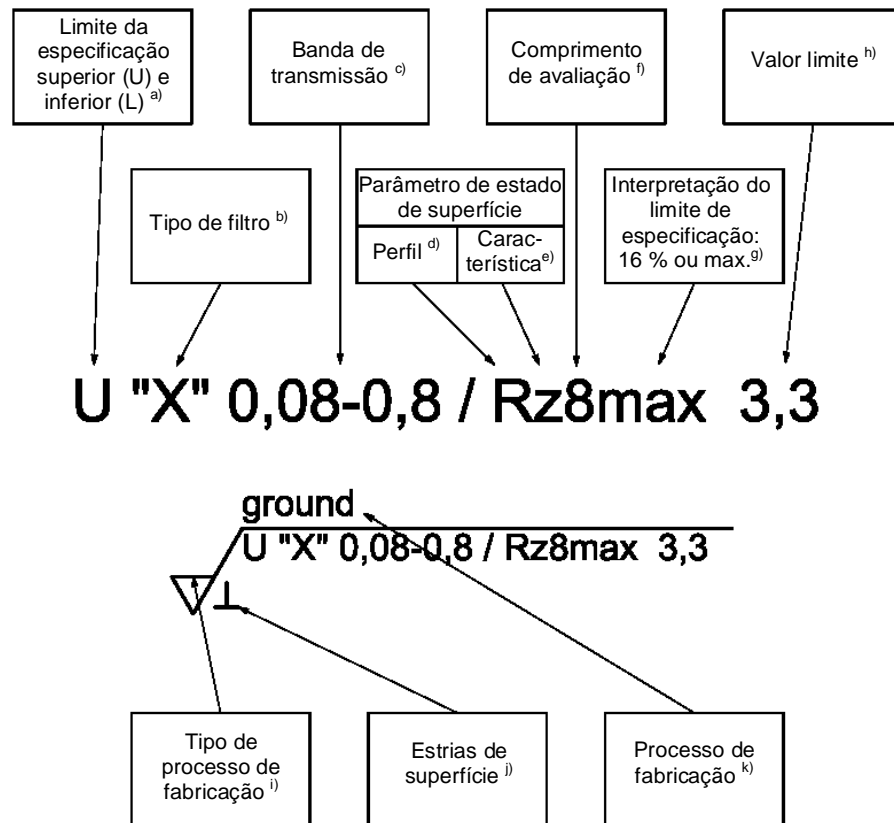
- obrigatoriedade de remoção de matéria da superfície especificada (MRR);
- utilização de um instrumento de medição com um filtro "gaussiano" (ISO 3274 e ISO 11562);
- estimativa do comprimento de base ("*cut-off wavelength*"),  $l_r = \lambda_c = 2,5 \text{ mm}$  (ISO 4288), a utilizar no instrumento de medição, em função do valor limite superior (U) esperado para o parâmetro Ra 3,2, e o estabelecimento da correspondente banda de transmissão 0,008-2,5 (ISO 3274);
- a medição deve ser efetuada num comprimento de avaliação  $l_n = 5 \times l_r$ ;
- utilização da regra dos 16 % para comparar os valores de Ra medidos com o limite de tolerância especificado (ISO 4288).

Nem todos os parâmetros têm uma correlação forte e universal com a função de uma superfície. Alguns parâmetros são altamente especializados em relação ao tipo ou à função da superfície ou a ambos. Existem dois grupos principais de parâmetros de estado de superfície para utilização em dois tipos principais de superfícies:

- **Superfícies de processo único** – resultam de um único processo de fabricação (p. ex. torneamento, retificação, fresagem, galvanização, pintura). Os parâmetros úteis nestes casos estão definidos nas normas ISO 4287 e ISO 12085. Em alguns casos, os parâmetros da ISO 13565-2 poderão ser úteis neste tipo de superfícies. Os parâmetros destinados a superfícies de processo único não dão, geralmente, resultados significativos quando utilizados em superfícies de dois processos.
- **Superfícies de dois processos** – Estas superfícies resultam de dois processos de fabricação, e apresentam uma parte das características dos dois estados de superfície, com influência na função da superfície resultante [p. ex.: superfícies retificadas parcialmente rodadas, superacabadas ou sujeitas a "*honing*" (retificação de cilindros)]. Os parâmetros para estas superfícies estão definidos nas normas ISO 13565-2 e ISO 13565-3.



Deve ser dada especial atenção à escolha da banda de transmissão, por omissão, especificada na norma ISO 4288. Mudanças pequenas e quase insignificantes, nas superfícies, poderão dar origem a diferenças até 50 % no valor do parâmetro medido, devido às regras da ISO 4288. Logo, a banda de transmissão ou, pelo menos, o comprimento de base necessita de ser sempre indicado no símbolo inscrito no desenho, em superfícies onde os estados de superfície são importantes para a função da peça. Em tais casos nunca se deverá utilizar o filtro por omissão.



- a) Indicação do limite de especificação superior (U) e inferior (L).
- b) Filtro tipo "X". O filtro normalizado é o filtro gaussiano (ISO 11562). O filtro anteriormente normalizado era o filtro 2RC. No futuro, outros filtros poderão ser normalizados. No período de transição, pode ser conveniente, para algumas empresas, indicar, nos desenhos, qual o tipo de filtro a utilizar. O tipo de filtro poderá ser indicado como "gaussiano" ou "2RC". Este não é normalizado, mas uma indicação do nome do filtro, tal como a aqui proposta, é inequívoca.
- c) A banda de transmissão é indicada como filtro de onda-curta e/ou de onda-longa.
- d) Perfil (*R*, *W* ou *P*).
- e) Característica/parâmetro.
- f) Comprimento de avaliação, *l<sub>n</sub>*, indicado através do número de comprimentos de base, *l<sub>r</sub>*. Quando se utilizam parâmetros de motivos, o comprimento de avaliação é indicado entre duas barras oblíquas, antes dos símbolos dos parâmetros de estado de superfície.
- g) Interpretação do limite de especificação ("regra dos 16 %" ou "regra do máx.").
- h) Valor limite em micrometros ( $\mu\text{m}$ ).
- i) Tipo do processo de fabricação.
- j) Estrias de superfície.
- k) Processo de fabricação.

Figura 10.58 – Elementos de controlo na indicação de requisitos de estado de superfície (método do perfil) em desenhos de engenharia (ISO 1302)

A comparação de dois ou mais valores de parâmetros de estado de superfície apenas faz sentido quando os valores individuais têm a mesma base – por exemplo, a banda de transmissão, o comprimento de avaliação e o processo de fabricação.

### 10.15.1 Indicação de requisitos para um controlo inequívoco da taxa de comprimento de sustentação

Em complemento às especificações da norma ISO 1302, o projeto de emenda ISO 1302:2002/DAM 2 (entretanto retirado) estabelecia o modo de construção dos requisitos de estados de superfície relativos à taxa de comprimento de sustentação de perfis  $R$ ,  $W$  e  $P$ . A existência de uma relação inequívoca (**de baixa incerteza**) entre os requisitos de um estado de superfície e a função dessa superfície requer a indicação de um número adequado de elementos necessários ao estabelecimento dessa relação.

Na figura 10.59, mencionam-se os elementos de controlo na indicação de requisitos da taxa de comprimento de sustentação,  $Rmr(c)$  ou  $Wmr(c)$ , sem qualquer nível de referência, para perfis  $R$  ou  $W$ , em desenhos de engenharia (ver figura 10.29).

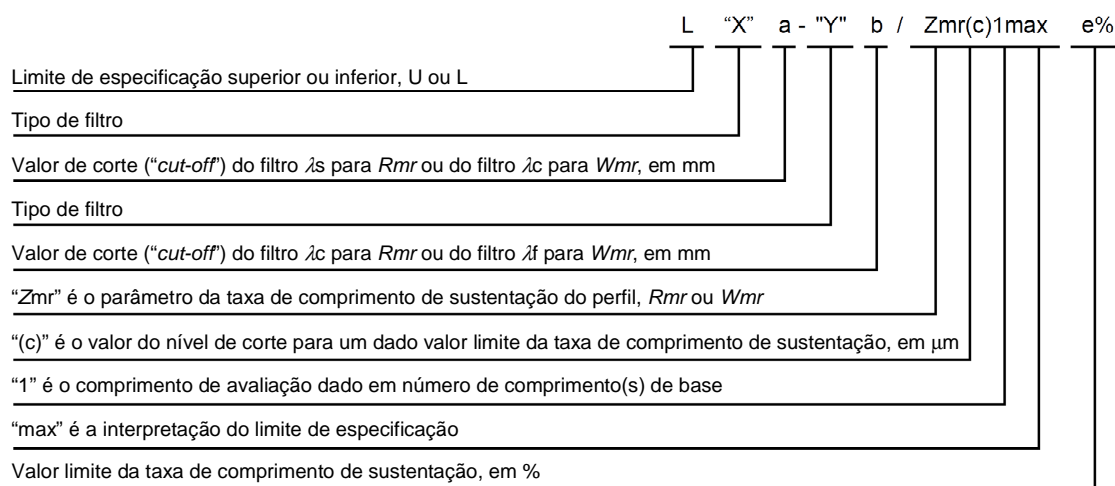


Figura 10.59 – Indicação de requisitos da taxa de comprimento de sustentação,  $Rmr(c)$  ou  $Wmr(c)$ , sem qualquer nível de referência, para perfis  $R$  ou  $W$  (ISO 1302:2002/DAM 2)

Na figura 10.60, assinalam-se os elementos de controlo na indicação de requisitos da diferença de alturas de corte,  $R\delta c$  ou  $W\delta c$ , da curva da taxa de comprimento de sustentação, para perfis  $R$  ou  $W$ . (ver também figura 10.30)

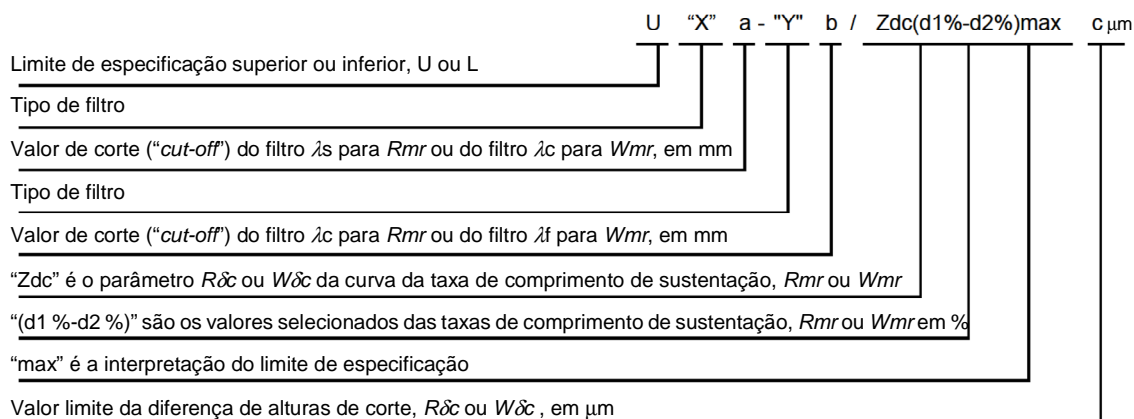


Figura 10.60 – Indicação de requisitos  $R\delta c$  ou  $W\delta c$ , da curva da taxa de comprimento de sustentação, para perfis  $R$  ou  $W$  (ISO 1302:2002/DAM 2)

Na figura 10.61, apresenta-se um exemplo de indicação, em desenho, da diferença de alturas de corte,  $R\delta_c$ , numa curva da taxa de comprimento de sustentação de um perfil de rugosidade  $R$ , baseado na indicação de requisitos descrita na figura 10.60.

$$\sqrt{U - 2,5 / R\delta_c(10\%-50\%) \ 2}$$

Figura 10.61 – Exemplo de indicação de requisitos da diferença de alturas de corte,  $R\delta_c$ , numa curva da taxa de comprimento de sustentação de um perfil de rugosidade (ISO 1302:2002/DAM 2)

Esta especificação pode ser interpretada como sendo relativa a uma diferença de alturas de corte,  $R\delta_c$ , numa curva da taxa de comprimento de sustentação de um perfil de rugosidade  $R$ , avaliado com um filtro de onda-curta, por omissão, e um filtro de onda-longa de tipo por omissão, com um valor de corte de  $\lambda_c = 2,5$  mm (ISO 4288). A diferença de alturas de perfil é avaliada entre taxas de comprimento de sustentação de 10 % e 50 %. A diferença máxima de alturas é de 2  $\mu$ m, aplicando-se, por omissão, a regra dos 16 %.

Por fim, na figura 10.62, destacam-se os elementos de controlo na indicação de requisitos da taxa do comprimento de sustentação relativa, com a indicação de um nível de referência, para perfis  $R$  ou  $W$ . (ver também figura 10.30).

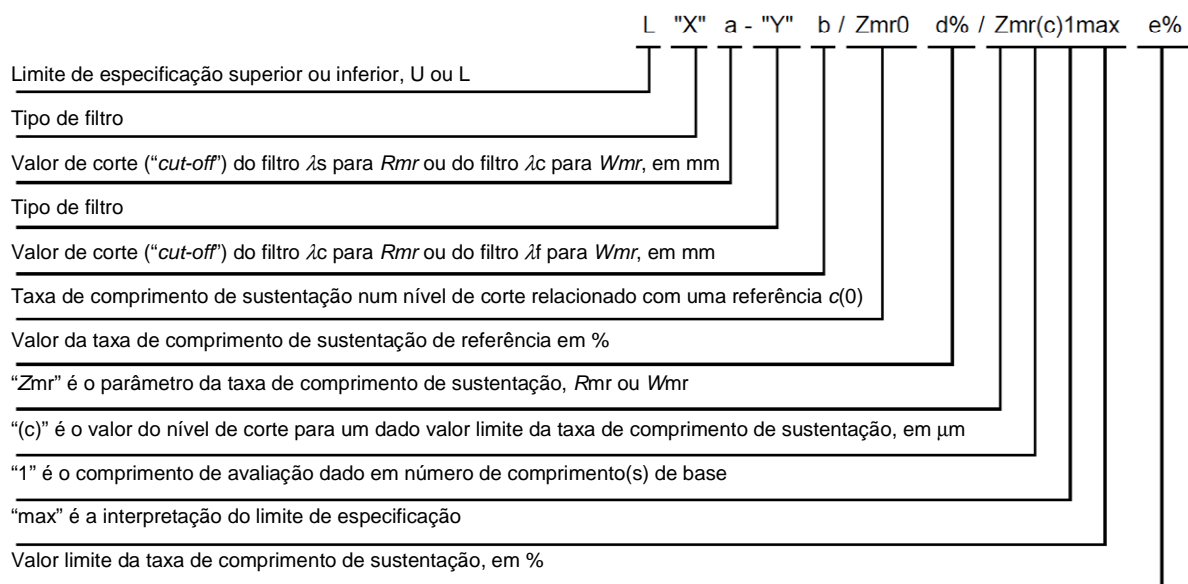


Figura 10.62 – Indicação de requisitos da taxa de comprimento de sustentação relativa, com um nível de referência, para perfis  $R$  ou  $W$  (ISO 1302:2002/DAM 2)

Na figura 10.63, apresenta-se um exemplo de indicação, em desenho, da taxa de comprimento de sustentação relativa, com um nível de referência, para um perfil de rugosidade, baseado na indicação de requisitos definida na figura 10.62.

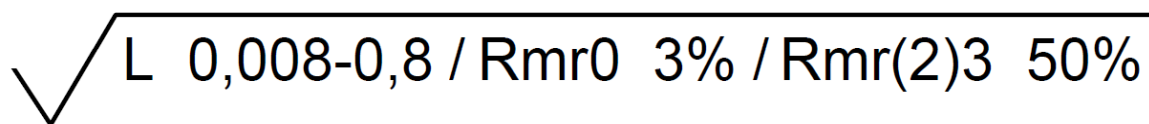


Figura 10.63 – Exemplo de indicação de requisitos da taxa de comprimento de sustentação relativa, com um nível de referência, para um perfil de rugosidade (ISO 1302:2002/DAM 2)

Esta especificação pode ser interpretada como sendo relativa à taxa de comprimento de sustentação de um perfil de rugosidade  $R$ , avaliado numa banda de transmissão de 0,008-0,8 mm, com um nível de referência correspondente a uma taxa de comprimento de sustentação de 3 %; taxa de comprimento de sustentação  $Rmr$  com um mínimo de 50 %, avaliada ao nível  $c = 2 \mu\text{m}$ , num comprimento de avaliação igual a três comprimentos de base, ( $l_n = 3 \times l_r = 2,4 \text{ mm}$ ); em que, por omissão, se aplica a regra dos 16 % e o tipo de filtro é o “gaussiano”.

A indicação do limite de especificação superior ou inferior deve sempre ser utilizada pois, ao contrário do que é costume com os outros parâmetros,  $Rmr$  e  $Wmr$  são normalmente especificados pelo seu limite inferior ( $L$ ).

O tipo de filtro normalizado, por omissão, é o “gaussiano” que não precisa de ser indicado. Outros tipos de filtros encontram-se em fase de normalização, nas normas da série ISO 16610. Se necessário, os tipos de filtros podem ser indicados, por exemplo, como “gaussiano” ou “2RC”.

A banda de transmissão é indicada através dos valores de corte de um filtro de onda-curta e de um filtro de onda-longa. Para os parâmetros  $R$ , há uma seleção, por omissão, do valor de corte do filtro de onda-longa,  $\lambda_c$ , e, por essa via, também do valor de corte do filtro de onda-curta,  $\lambda_s$ , que, por isso, não precisa de ser indicado (ver normas ISO 4288 e ISO 3274). Para parâmetros  $W$ , não há quaisquer filtros por omissão e, como tal, deverão ser sempre indicados. Neste caso, se forem também especificados parâmetros  $R$ , o filtro  $\lambda_s$  do parâmetro  $R$ , por omissão, também se aplica ao perfil  $W$  e, portanto, não precisa ser indicado.

O comprimento de avaliação,  $l_n$ , é indicado em função do número de comprimentos de base (“sampling lengths”), em que um comprimento de base,  $l_r$ , é igual ao valor de corte do filtro de onda-longa. Para o perfil  $R$ ,  $l_n = 5 \times l_r$  e não necessita de ser indicado. Para o perfil  $W$ , o comprimento de avaliação deve ser sempre indicado.

Na interpretação dos limites de especificação, pode aplicar-se a regra dos 16 % (a regra por omissão), ou a regra do valor máximo, que deve ser sempre especificada, conforme se mostra nas indicações abordadas nas figuras 10.59 a 10.61.

Por fim, em termos da especificação do nível de referência, ver a alínea d) da secção 10.5.1.3 deste texto.

### 10.15.2 Indicações para um controlo inequívoco das funções das superfícies avaliadas pelos métodos de medição tridimensionais (de superfície)

Uma especificação de estado de superfície (“*areal*”) é construída a partir de vários elementos de controlo diferentes, para além do correspondente parâmetro caracterizador (ver ISO 25178-2) e do seu valor numérico, que podem ser parte da indicação no desenho ou da indicação em texto, dada noutros documentos. A generalidade desses elementos é necessária para a formação de uma relação inequívoca entre o requisito de estado de superfície (“*areal*”) e a função da superfície. Nas indicações de estados de superfície (“*areal*”) seguidamente abordadas, os elementos inscritos entre parêntesis angulares < > são de especificação obrigatória e os indicados entre parêntesis retos [ ] são de especificação opcional, uma vez que podem ser substituídos por condições por omissão (“*by default*”).

Na figura 10.64, mencionam-se os elementos de controlo em indicações de **estados de superfície S-L**, em desenhos de engenharia. Uma superfície S-L é uma superfície derivada da superfície S-F através da remoção dos componentes de grande escala por meio de um filtro L (ver ISO 25178-2, secção 3.1.6). Uma superfície S-F deve ser especificada se o desvio de forma estiver contido na mensuranda.

[ limite ] S-L < filtro S > – < filtro L > [ operador F ] / < parâmetro > < valor > [ unidade ] / [ ES ] [ OR(n) ]	
a)	<b>Limite:</b> indicação do limite de especificação superior (U) ou inferior (L) (ver ISO 25178-1 e ISO 1302, secção 6.6).
b)	<b>Superfície S-L:</b> superfície derivada da superfície S-F através da remoção dos componentes de grande escala, por meio de um filtro L (ver ISO 25178-2, secção 3.1.6). A superfície S-F é derivada do perfil primário por meio da remoção da forma através da utilização de um operador F (ver ISO 25178-2).
c)	<b>Filtro S:</b> tipo de filtro e “ <i>nesting index</i> ” do filtro S de superfície que remove os pequenos componentes laterais da superfície e permite a obtenção da superfície primária (ver ISO 25178-2 e ISO 25178-3, secção 4.2.3).
d)	<b>Filtro L:</b> tipo de filtro e “ <i>nesting index</i> ” do filtro L de superfície que remove os componentes laterais de grande escala da superfície primária ou da superfície S-F (ver ISO 25178-2 e ISO 25178-3, secção 4.4.3).
e)	<b>Operador F:</b> operador (conjunto ordenado de operações) que remove a forma da superfície primária (ver ISO 25178-2). Tipo de operador de associação (ver ISO 25178-1, quadro E3). Um filtro pode também ser utilizado como um operador (ver também ISO 25178-3, secção 4.4).
f)	<b>Parâmetro:</b> nome do parâmetro de superfície (“ <i>areal</i> ”) (ver ISO 25178-2, secção 3.2).
g)	<b>Valor:</b> valor limite especificado para o parâmetro.
h)	<b>Unidade:</b> unidade do valor do parâmetro, quando não se trata da unidade por omissão (a unidade por omissão, em µm, não necessita de ser indicada).
i)	<b>ES:</b> símbolo para a opção “superfície eletromagnética”. A “superfície mecânica”, considerada por omissão, não necessita de ser indicada. Ver também a ISO 25178-3, quadro 3).
j)	<b>OR(n):</b> símbolo para a opção “outros requisitos”, que indica que essa informação textual está noutro local assinalado no desenho.

Figura 10.64 – Elementos de controlo em indicações de estados de superfície S-L, em desenhos de engenharia (ISO 25178-1)

O “*nesting index*” (en) ou “*indice d’imbrication*” (fr), *NI*, do filtro, é o número ou o conjunto de números que indica o nível relativo de imbricação para um “modelo matemático primário” – conjunto de representações matemáticas imbricadas da porção de superfície, em que cada representação neste conjunto pode ser descrita por um número finito de parâmetros – particular (ISO 16610-1). Os modelos com um índice mais baixo contêm mais informação da superfície. Por convenção, quando este índice tende para zero (ou para uma série completa de zeros), existe um modelo matemático

primário que aproxima a superfície real de uma peça com a exatidão que se queira. O valor de corte (“*cut-off*”) do filtro gaussiano é um exemplo de um “*nesting index*”. Para um filtro morfológico, o “*nesting index*” é o tamanho do elemento estruturante (p. ex. o raio do disco) que é diferente do conceito de comprimento de onda, subjacente à noção de “*cut-off*”, (ver ISO 16610-1, secção 4).

Na figura 10.65, apresenta-se um exemplo de indicação, em desenho, de um parâmetro de campo (“*field parameter*”) (parâmetro definido a partir de todos os pontos de uma superfície à escala limitada, isto é, uma superfície S-F ou uma superfície S-L, ver ISO 25178-2) utilizando todos os valores por omissão e baseado na indicação de requisitos apresentada na figura 10.64.

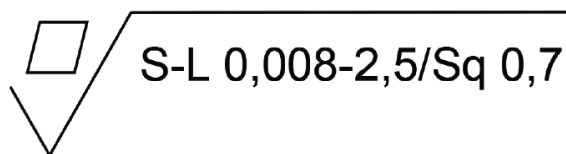


Figura 10.65 – Indicação de um parâmetro de campo utilizando todos os valores por omissão indicados na ISO 25178-3 (ISO 25178-1)

Esta especificação pode ser interpretada como sendo relativa a uma superfície S-L, sem requisitos de fabricação, avaliada com um filtro S com um “*nesting index*” = 0,008 mm e um filtro L com um “*nesting index*” = 2,5 mm, através do parâmetro Sq (“altura média quadrática da superfície à escala limitada”, ver ISO 25178-2, secção 4.1.1) com um valor limite superior de 0,7 µm. Os valores por omissão estão indicados na ISO 25178-3. A área de avaliação deve ser um quadrado, cujos lados têm um comprimento igual ao valor do “*nesting index*” do filtro L.

Na figura 10.66, mencionam-se os elementos de controlo em indicações de **estados de superfície S-F**, em desenhos de engenharia. Uma superfície S-F é uma superfície derivada do perfil primário por meio da remoção da forma, através da utilização de um operador F (ver ISO 25178-2, secção 3.1.5), se a mensuranda contiver o desvio de forma.

[ limite ] S-F < filtro S > – < operador F > / < parâmetro > < valor > [ unidade ] [ ES ] [ OR(n) ]

- a) **Limite:** indicação do limite de especificação superior (U) ou inferior (L) (ver ISO 25178-1 e ISO 1302, secção 6.6).
- b) **Superfície S-F:** superfície derivada do perfil primário por meio da remoção da forma através da utilização de um operador F (ver ISO 25178-2, secção 3.1.5).
- c) **Filtro S:** tipo de filtro e “*nesting index*” do filtro S de superfície (ver ISO 25178-1, quadros E1 e E2) que remove os pequenos componentes laterais da superfície e permite a obtenção da superfície primária (ver ISO 25178-2 e ISO 25178-3, secção 4.2.3).
- d) **Operador F:** operador (conjunto ordenado de operações) que remove a forma da superfície primária (ver ISO 25178-2). Tipo de operador de associação e “*nesting index*” (ver ISO 25178-1, quadro E3). Um filtro (ver ISO 25178-1, quadro E1) pode também ser utilizado como um operador F (ver também ISO 25178-3, secção 4.4).
- e) **Parâmetro:** nome do parâmetro de superfície (“*areal*”) (ver ISO 25178-2, secção 3.2).
- f) **Valor:** valor limite especificado para o parâmetro.
- g) **Unidade:** unidade do valor do parâmetro, quando não se trata da unidade por omissão (a unidade por omissão, em µm, não necessita de ser indicada).
- h) **ES:** símbolo para a opção “superfície eletromagnética”. A “superfície mecânica”, considerada por omissão, não necessita de ser indicada. Ver também a ISO 25178-3, quadro 3).
- i) **OR(n):** símbolo para a opção “outros requisitos”, que indica que essa informação textual está noutro local assinalado no desenho.

Figura 10.66 – Elementos de controlo em indicações de estados de superfície S-F, em desenhos de engenharia (ISO 25178-1)

1º Exemplo de especificação de um estado de superfície S-F com um operador F que é filtro por omissão, G (mínimos quadrados totais), não indicado, mas com o valor de F especificado:

## S-F 0,008-8 / Sa 0,5

Especificação relativa a uma superfície S-F, avaliada com um filtro S com um “*nesting index*” = 0,008 mm, e uma operação F de associação com um “*nesting index*” de substituição [lado (do quadrado) da área de avaliação = 8 mm], através do parâmetro Sa (“altura média aritmética”, ver ISO 25178-2, secção 4.1.7) com um valor limite superior de 0,5 µm. Uma vez que o operador G não é um filtro, a área de avaliação deve ser, tipicamente, cinco vezes a estrutura mais grosseira considerada (ver ISO 25178-1).

2º Exemplo de especificação de um estado de superfície S-F com um operador F, que é um filtro não definido por omissão:

## S-F 0,008-RG2,5 / Sa 0,5

Especificação relativa a uma superfície S-F, avaliada com um filtro S com um “*nesting index*” = 0,008 mm, e uma operação F de filtragem com um filtro gaussiano robusto (RG) com um “*nesting index*” (comprimento de corte) = 2,5 mm, através do parâmetro Sa (“altura média aritmética”, ver ISO 25178-2, secção 4.1.7) com um valor limite superior de 0,5 µm. A área de avaliação deve ser um quadrado cujos lados têm um comprimento igual ao valor do “*nesting index*” do filtro RG (ver ISO 25178-3, secção 4.2.1.2).

Na figura 10.67, mencionam-se os elementos de controlo em indicações do valor do parâmetro, *Smr*, relativo à taxa de superfície de sustentação, em desenhos de engenharia. Estas indicações são válidas para os estados de superfície S-L e S-F.

**Smr( [ valor de referência c ] < valor assinalado c > ) < valor > [ unidade ]**

- a) **Smr**: parâmetro do requisito da taxa de superfície de sustentação.
- b) **Valor de referência c**: especificação do nível de referência em percentagem, na curva da taxa de superfície de sustentação (ver ISO 25178-2, secção 4.4.3). A referência por omissão é o nível médio, 50 %, da curva da taxa de superfície de sustentação e não necessita de ser indicado.
- c) **Valor assinalado c**: altura especificada em relação ao valor de referência c, em µm (ver ISO 25178-2, secção 4.4.2). Este valor é negativo se estiver abaixo do valor de referência c e positivo se estiver acima desse valor de referência c.
- d) **Valor**: valor limite especificado para o parâmetro.
- e) **Unidade**: unidade por omissão, %, deverá ser sempre indicada.

Figura 10.67 – Elementos de controlo em indicações do valor do parâmetro, *Smr*, da taxa de superfície de sustentação, em desenhos de engenharia (ISO 25178-1)

Normalmente, o valor *Smr* é especificado como um valor limite mínimo, o que implica a inscrição do limite de especificação (L), conforme se indica no exemplo seguinte.

Na figura 10.68, apresenta-se um exemplo de indicação, em desenho, de um parâmetro de campo com dois requisitos não definidos por omissão, baseado na indicação de requisitos apresentada na figura 10.67.

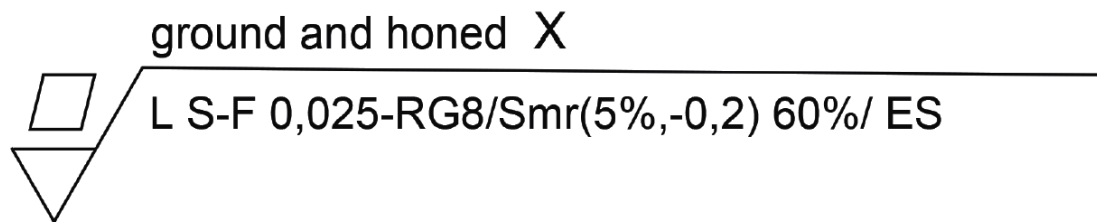


Figura 10.68 – Indicação de um parâmetro de campo utilizando dois requisitos não definidos por omissão (ISO 25178-1)

Esta especificação pode ser interpretada como sendo relativa a uma superfície S-F, com requisitos de fabricação [retificada e rodada (“*ground and honed*”)] e de orientação das estrias de superfície (X), e com a especificação do limite inferior de tolerância. A superfície é avaliada com um filtro S com um “*nesting index*” = 0,025 mm e o operador F, não definido por omissão, é um filtro gaussiano robusto (RG) com um “*nesting index*” = 8 mm. O parâmetro S escolhido é a “taxa de superfície de sustentação da superfície à escala limitada”, *Smr* (ver ISO 25178-2, secção 4.4.2), com um valor limite mínimo de 60 %, ao nível  $c = 0,2 \mu\text{m}$ , e medida para baixo, a partir do plano de referência definido por  $Smr = 5 \%$ . A especificação da superfície extraída, não efetuada por omissão, é uma superfície eletromagnética.

O desenvolvimento das técnicas de medição com e sem contacto, registado nas duas últimas décadas, e a extensão da avaliação dos estados de superfície do domínio bidimensional (métodos do perfil) para o domínio tridimensional (superfícies) têm sido acompanhados por uma intensa atividade normativa nestes domínios, nomeadamente em termos de indicações dos estados de superfície na documentação técnica, definições de novos parâmetros, operadores de especificação, métodos de medição, características dos instrumentos de medição, etc. (através da elaboração de novas normas da série ISO 25178) e no domínio da filtragem (por via das normas da série ISO 16610), de modo que estes novos conceitos se possam expandir de um modo consistente, ao nível industrial.

Os exemplos de indicações de requisitos de estados de superfície com vista à sua avaliação por intermédio de métodos de medição tridimensionais (“*areal*”), atrás abordados, mostram uma definição explícita deste tipo de especificações geométricas em termos de conjuntos ordenados de operações (operadores), conforme já tinha sido referido na secção 10.9 deste texto. De acordo com a norma ISO 25178-3, um operador de especificação completo (ver também a ISO 17450) inclui todas as operações necessárias para o estabelecimento de uma relação inequívoca entre a especificação do estado de superfície e a função dessa superfície, sendo constituído por um conjunto completo e ordenado de operações de especificação. No caso dos estados de superfície (“*areal*”), o operador de especificação completo define o tipo de superfície, o método de extração, o método de associação e o método de filtragem.



De acordo com P. Bennich e H Nielsen [B1], indicações dos estados de superfície, do tipo das inscritas nos exemplos das figuras 10.51 a 10.54, sem elementos adicionais, podem dar origem a ambiguidades de especificação que podem atingir os 30 %.

A evolução verificada no âmbito da caracterização dos estados de superfície dá uma ideia da importância que está a ser atribuída à necessidade de estabelecer especificações inequívocas para os requisitos adequados às funções desempenhadas pelas superfícies das peças e tem dado um contributo muito positivo para os desenvolvimentos que se vêm registando nos domínios das micro e das nanotecnologias.

## 10.16 Critérios para a especificação de valores para os parâmetros de rugosidade

As superfícies dos diferentes componentes de um mecanismo devem ter características adequadas ao tipo de funções por eles desenvolvidas, podendo a sua rugosidade desempenhar um papel importante no comportamento desses componentes mecânicos.

A seleção dos valores adequados a atribuir aos parâmetros adotados para caracterizar a rugosidade das diferentes superfícies de uma dada peça baseia-se, fundamentalmente, na experiência anteriormente adquirida e em indicações existentes na literatura técnica da especialidade, sobretudo relativas a **parâmetros avaliados por intermédio do método do perfil**, e, cada vez mais, em resultados de ensaios de protótipos físicos obtidos através de meios de fabrico aditivo, num ambiente de engenharia simultânea.

Com base na literatura técnica da especialidade, a especificação dos valores adequados a atribuir aos diferentes parâmetros caracterizadores da rugosidade das superfícies pode fazer-se tendo em conta:

- A rugosidade das superfícies associada aos diferentes tipos de métodos de fabricação utilizados na sua obtenção, ver exemplos nos quadros 10.6 e 10.7.
- A relação entre os valores de rugosidade e a função das superfícies, ver exemplos nos quadros 10.8 e 10.9.
- Os valores de rugosidade considerados adequados para diferentes tipos de aplicações correntes, ver exemplos nos quadros 10.9 e 10.10.
- As relações práticas existentes entre valores de diferentes parâmetros de rugosidade das superfícies e as tolerâncias dimensionais dos tamanhos dos respetivos elementos geométricos, ver secção 10.16.1 deste texto.

A observação do quadro 10.6, relativo à “rugosidade média aritmética”,  $R_a$ , e do quadro 10.7, correspondente à “média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade”,  $R_z$ , permite

constatar que um mesmo grau de acabamento de superfície pode ser atingido através de diferentes métodos de fabricação e que cada método de fabricação permite a obtenção de diversos graus de acabamento (desde os derivados de desbastes mais ou menos grosseiros até aos resultantes de acabamentos muito cuidados – ambos representados pelas zonas triangulares extremas).

Logo, o trabalho adequado para permitir a obtenção de uma dada rugosidade não deve estar vinculado a um determinado método de fabricação. Estabelecida a função da superfície, através das especificações inscritas no desenho de definição da peça, o departamento de métodos de fabrico da empresa deve ter condições para escolher o método de fabricação que a forma, a matéria e a natureza da superfície indiquem como sendo o mais racional e económico possível, relativamente aos meios de produção disponíveis, tendo também em consideração a eventual informação obtida previamente em ambiente de engenharia simultânea.

Quadro 10.6 – Rugosidade média aritmética associada com diferentes tipos de métodos de fabricação

		Valores possíveis de rugosidade média aritmética $R_a$						DIN 4766: 1981 Parte 2											
Métodos de fabricação		Manufacturing method		Attainable arithmetical mean value $R_a$ in $\mu m$															Remarks
Designação do método		Main group	Designation of method	0.006	0.012	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50		
Fundição em areia		Casting	Sand mould casting															1)	
Fundição em carapaça			Shell mould casting															1)	
Fundição em coquilha			Chill casting																
Fundição injetada			Die casting																
Fundição em cera perdida			Investment casting																
Forjamento em matriz fechada		Forming	Drop forging																
Laminagem de chapas			Plain rolling																
Embutidura profunda			Deep-drawing of sheet																
Extrusão dir./inv. - extrusão			Extrusion moulding, extruding																
Estampagem			Stamping																
Laminagem de perfis		Separating	Rolling of shapes																
Corte			Cutting																
Torneamento - cilíndrico			Longitudinal turning																
Torneamento - facejar			Facing																
Torneamento - ranhurar			Grooving																
Aplainamento c/ plaina mecânica			Planing																
Aplainamento c/ limador			Shaping																
Acabamento <i>shaving</i> p/ engrenagens			Shaving																
Furação			Drilling																
Mandrilagem			Boring																
Escariar / rebaixar			Counterboring																
Alargamento de furos (c/ mandril)			Reaming																
Fresagem cilíndrica			Circumferential milling																
Fresagem frontal			Face milling																
Brochagem			Broaching																
Limagem			Filing																
Retificação cilíndrica			mov. de rotação da peça	Circular longitudinal grinding															
Retificação de face				Circular surface grinding															
Retificação mergulhante			de superfícies planas	Circular plunge grinding															
Retificação tangencial				Surface circumferential grinding															
Retificação frontal				Surface frontal grinding															
Polimento				Polish-grinding															
Retificação de cilindros			Honing																
Superacabamento			Superfinishing																
Rodagem cilíndrica			Circular lapping																
Rodagem plana			Surface lapping																
Ultra-sons			Ultrasonic machining																
Lapidagem			Buffing																
Granalhagem			Abrasive blasting																
Rebarbagem por vibrador			Tumbling																
Oxicorte			Flame cutting																
		1) c/ este método de fundição podem ser esperados valores de $R_a$ até 125 $\mu m$ , no caso de peças com uma massa unitária até 250 kg.																	

A norma ASME B46.1:2009, no seu Apêndice B, apresenta também um quadro com intervalos típicos de valores de Rugosidade média aritmética,  $R_a$ , que poderão ser obtidos através de métodos de fabricação correntes e que cujos limites divergem muito pouco dos propostos na DIN 4766-2.

Quadro 10.7 – Média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade associada com diferentes tipos de métodos de fabricação

		Valores possíveis da média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade $R_z$		DIN 4766: 1981 Parte 1	
Métodos de fabricação		Manufacturing method		Attainable arithmetical mean value of peak-to-valley height $R_z$ in $\mu\text{m}$	
Designação do método		Main group	Term	0.04 0.06 0.1 0.16 0.25 0.4 0.63 1 1.6 2.5 4.0 6.3 10 16 25 40 63 100 160 250 400 630 1000	
Fundição em areia		Casting	Sand mould casting		
Fundição em carapaça			Shell mould casting		
Fundição em coquilha			Chill casting		
Fundição injetada			Die casting		
Fundição em cera perdida			Investment casting		
Forjamento em matriz fechada		Forming	Drop forging		
Laminagem de chapas			Plain rolling		
Embutidura profunda			Deep drawing of sheet		
Extrusão			Extrusion		
Estampagem			Stamping		
Laminagem de perfis			Rolling of shapes		
Corte		Separating	Cutting		
Torneamento - cilíndrico			Plain turning		
Torneamento - facejar			Surfacing		
Torneamento - ranhurar			Grooving		
Aplainamento c/ plaina mec.			Planing		
Escatelamento			Slotting		
Rascagem			Scraping		
Furação			Drilling		
Mandrilagem			Boring		
Escariar / rebaixar			Counterboring		
Alargamento de furos (c/ mandril)			Reaming		
Fresagem cilíndrica			Cylindrical milling		
Fresagem frontal			Face milling		
Brochagem			Broaching		
Limagem			Filing		
Retificação cilíndrica			Cylindrical grinding		
Retificação de face			Cylindrical surface grinding		
Retificação mergulhante			Cylindrical plunge grinding		
Retificação tangencial			Surface peripheral grinding		
Retificação frontal			Surface face grinding		
Polimento			Polish grinding		
Retificação de cilindros			Honing		
Superacabamento			Superfinishing		
Rodagem cilíndrica			Cylindrical lapping		
Rodagem plana			Surface lapping		
Ultra-sons			Ultrasonic machining		
Lapidagem			Buffing		
Granalhagem			Abrasive blasting		
Rebarbagem por vibrador			Barrel polishing		
Oxicorte			Flame cutting		

No gráfico da figura 10.69, apresenta-se uma relação aproximada entre os tempos relativos de diferentes operações de corte por arranque de aparta, necessárias para a obtenção de superfícies com determinados valores do parâmetro,  $R_a$ , bem como as limitações técnicas, neste domínio, inerentes a um certo número de métodos de fabricação para metais, utilizando ferramentas normalizadas [G1].

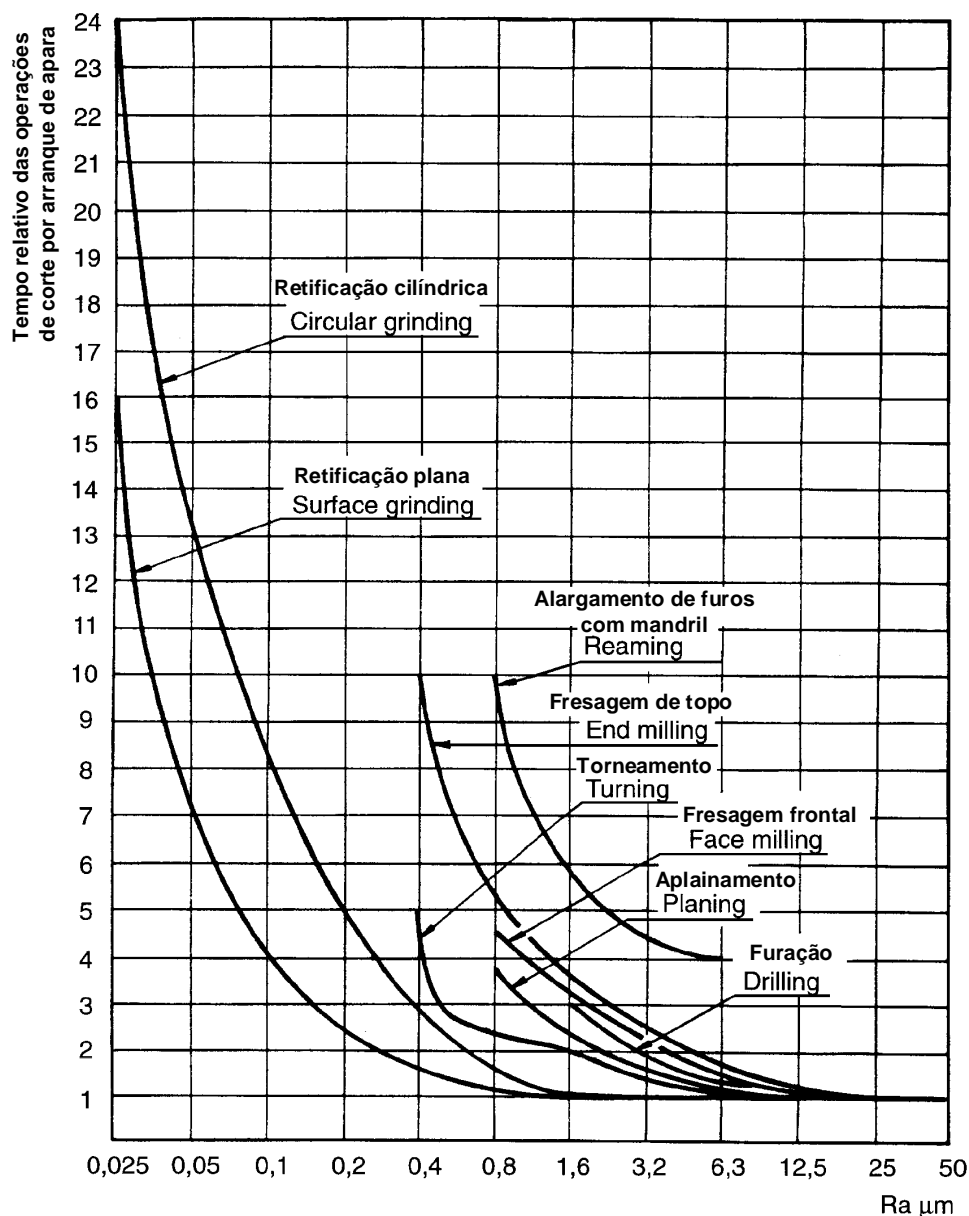


Figura 10.69 – Relação entre tempos relativos a operações de corte por arranque de apara para a obtenção de diferentes valores de  $R_a$  ([G1] e norma SAAB STD 28:1996)

Atendendo a que o parâmetro  $R_a$  foi desde sempre um dos parâmetros mais utilizados, em todo o mundo, para caracterizar os estados de superfície, avaliados pelo método do perfil, estando disponível na maioria dos respetivos instrumentos de medição, a recomendação ISO/R 468:1966 estabeleceu uma série de valores numéricos recomendados de 2ª escolha, segundo uma série de números normais (série Renard) arredondados,  $R' 10$  (0,008 ... 100), com 32 termos, e uma série de valores numéricos recomendados de 1ª escolha, segundo uma série derivada de números normais arredondados,  $R' 10/3$  (0,025 ... 50), com 12 termos, para a especificação de valores da rugosidade média aritmética,  $R_a$ , em superfícies, na documentação técnica (ver exemplos na figura 10.33 e nos quadros 10.6, 10.8 a 10.11).

Quadro 10.8 – Relação entre os valores de rugosidade e a função das superfícies [C2]

Superfície		Funções aplicadas à superfície		Exemplos de aplicação <sup>1)</sup>			
		Designações	Símbolo	Condições normais	Ra μm	Condições difíceis	Ra μm
Duas peças em contacto	com deslocamento relativo	Escorregamento (lubrificado)	<b>FG</b>	Chumaceiras – moentes de veios	0,8 1,6	Corrediça de máq.-ferramenta	0,4 0,8
		Atrito seco	<b>FS</b>				
		Rolamento	<b>FR</b>	Corpos rolantes	0,2 0,4	Caminho de rolamento de esferas	0,05 0,1
		Resistência ao encalque	<b>RM</b>	Cames de tornos automáticos	0,1 0,4	Extremidades de impulsores	0,05 0,1
		Atrito fluído	<b>FF</b>	Conduitas de alimentação	0,8 6,3	Difusores (“gicleurs”) injetores	0,2
		Vedação dinâmica com junta sem junta	<b>ED</b>	Superfícies para juntas toroidais (“O” rings)	0,4 0,8	Superfícies para juntas com lábios	0,3 0,4
	sem deslocamento	Vedação estática com junta sem junta	<b>ES</b>	Superfícies de vedação com junta plana	0,8 1,6	Superfícies de vedação polidas sem junta	0,05 0,1
		Ligação fixa (tensões fracas)	<b>AF</b>	Suportes e centragens de peças fixas desmontáveis	1,6 3,2	Suportes e centragens com exatidão	0,8 1,6
		Ligação sem deslocamento, com tensões	<b>AC</b>	Alojamentos de chumaceiras	0,8 1,6	Alojamentos de rolamentos	0,4 0,8
		Aderência (colagem)	<b>AD</b>	Construções coladas	1,6 a 3,2		
Superfície independente	c/ tensões	Ferramentas de corte (superfície de corte)	<b>OC</b>	Ferramentas de aço rápido	0,4	Ferramentas de carboneto duro	0,2
		Tensões de fadiga	<b>EA</b>	Furos de forquilhas de cilindros	1,6	Barras de torção	0,8
	sem tensões	Resistência à corrosão	<b>RC</b>				
		Revestimento (pintura)	<b>RE</b>	Carroçarias de automóveis	≥ 3,2		
		Revestimento eletrolítico	<b>DE</b>	Indicar a rugosidade exigida pela função, após deposição	0,1 a 3,2		
		Medições	<b>ME</b>	Faces de calibres de oficina	0,1		
		Aparência (aspeto)	<b>AS</b>				

<sup>1)</sup> Valores de Ra dados a título indicativo.

Quadro 10.9 – Valores de referência para a escolha dos parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  (norma SAAB STD 28:1996)

Exemplos		$R_z \mu m$																$R_a \mu m$																		
		0,2	0,4	0,7	1,25	2,2	4	8	12,5	25	50	100	200	400	1000	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	250							
1	Superfícies onde existem grandes exigências de uniformidade. Superfícies de escorregamento, em peças que são delicadas de um ponto de vista funcional. Instrumentos cirurgicos, de medição, calibres, etc.	f																																		
		m																																		
		g																																		
2	Superfícies de sustentação, (revestimentos), superfícies de escorregamento. Rolamentos de esferas e de rolos, esferas, rolos, caminhos para rolos. Superfícies de contacto para transmissão de eletricidade. Instrumentos de medição, calibres.	f																																		
		m																																		
		g																																		
3	Camisas de cilindros. Superfícies de guiamento e superfícies de escorregamento. Moentes. Chumaceiras para veios. Transições radiais em peças sujeitas a fadiga. Sedes de rolamentos de esferas e rolos.	f																																		
		m																																		
		g																																		
4	Sedes de válvulas. Superfícies de veios sujeitos a tensões elevadas, por exemplo, veios com torção. Superfícies de vedação para peças de borracha de vedações móveis. Superfícies polidas para revestimentos de superfície. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT5 – 7.	f																																		
		m																																		
		g																																		
5	Rugosidade de superfície geral para veios maquinados sujeitos a carregamento. Superfícies de vedação para peças de borracha de vedações fixas. Superfícies para revestimento. Anilhas de contacto axial. Superfícies de contacto. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT6 – 8.	f																																		
		m																																		
		g																																		
6	Superfícies dos flancos de roscas, rodas dentadas e acoplamentos por estrias (retificadas). Superfícies de chapas laminadas a frio. Superfícies de vedação sem junta intermédia. Superfícies para revestimentos. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT7 – 9.	f																																		
		m																																		
		g																																		
7	Superfícies dos flancos de roscas, rodas dentadas e acoplamentos por estrias (fresadas ou alargadas). Superfícies de vedação com junta intermédia. Escatéis. Superfícies de apoio (gornes) de correias em polias. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT8 – 10.	f																																		
		m																																		
		g																																		
8	Superfícies de contacto. Escatéis. Superfícies livres. Orelhas de guiamento. Superfícies onde o aspeto é importante mas que não têm uma função particular. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT9 – 13.	f																																		
		m																																		
		g																																		
9	Superfícies separadas. Furos resultantes de furação. Zonas desaforadas (ranhuras livres) que não estão sujeitas a fadiga. Superfícies extremas sem uma função particular. Superfícies com graus de tolerância IT10 ou piores.	f																																		
		m																																		
		g																																		
10	Outras superfícies sem qualquer função particular.	f																																		
		m																																		
		g																																		
11	Superfícies torneadas grosseiras em peças em bruto, etc.	f																																		
		m																																		
		g																																		
		f	= classe fina para fabricação com exatidão e engenharia fina.																																	
		m	= classe média para concepções de mecânica geral.																																	
		g	= classe grosseira para concepções com menos qualidade.																																	

Quadro 10.10 – Valores de rugosidade média aritmética,  $R_a$ , para diferentes tipos de aplicações [M1]

<b>RUGOSIDADE</b> $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	<b>APLICAÇÕES (a título indicativo)</b> Valores recomendados da série Renard R' 10/3
<b>0,025</b>	Faces de medição de micrómetros. Espelhos. Faces de medição de blocos-padrão. Blocos de apoio de exatidão.
<b>0,05</b>	Faces de calibres de oficina. Planos de apoio para comparadores. Injetores de combustível.
(0,08) <b>0,1</b> (VVVV) (símbolo antigo)	Faces de calibradores de cursor. Eixos de articulação. Ferramentas de exatidão. Chumaceiras (casquilhos) superacabadas. Acoplamentos estanques a alta pressão, em movimento alternado. Superfícies acopladas de peças, com movimento alternado, de retenção de líquido sob pressão. Superfícies de retenção polidas, sem junta.
(0,125) (0,16) <b>0,2</b>	Suportes bipartidos de veios e árvores de cames. Superfícies de cames. Mancal de biela. Haste de válvula. Cilindros de bombas hidráulicas. Cilindros hidráulicos. Chumaceiras (casquilhos) polidas. Alojamentos da chumaceiras de alta velocidade. Veios de turbinas. Acoplamentos estanques, com movimentação manual. Guias de máquinas de máquinas-ferramenta. Mancais (suportes) de veios de rotores de turbinas, de redutores, etc.
(0,25) (0,32) <b>0,4</b>	Veios estriados. Chumaceiras de veios motores. Superfície externa de pistões. Superfícies internas de cilindros de motores. Veios de grandes máquinas elétricas. Acoplamentos apertados. Sedes de válvulas. Superfícies de fecho e obturadores de válvulas, etc. Faces de medição de exteriores de paquímetros. Mancais bipartidos de veios. Chumaceiras de metal branco (liga de estanho, antimónio e cobre c/ zinco ou chumbo). Superfícies de peças deslizantes, tais como patins e respetivas guias.
(0,5) (0,63) <b>0,8 (VVV)</b>	Tambores de freios. Furos polidos. Peças de exatidão. Chumaceiras (casquilhos) de bronze e casquilhos retificados. Dentes de engrenagens. Superfícies de retenção de flanges sem juntas. Mancais bipartidos de veios. Casquilhos em metal branco (liga de estanho, antimónio e cobre c/ zinco ou chumbo). Superfícies de peças deslizantes, tais como patins e respetivas guias.
(1,0) (1,25) <b>1,6</b>	Faces de referência de rodas dentadas. Veios e furos de rodas dentadas. Cabeças de cilindros. Superfícies em contacto de caixas de engrenagens em ferro fundido. Faces de pistões. Superfícies de retenção de flange com juntas.
(2,0) (2,5) <b>3,2 (VV)</b>	Veios e casquilhos para transmissões manuais. Superfícies de acoplamento de peças fixas desmontáveis (flanges de uniões, batentes de centragem, etc.).
(4,0) (5,0) <b>6,3</b>	Superfícies de retenção de flanges, com juntas comuns. Faces de montagem do corpo de uma caixa de engrenagens.
8,0 (10,0) <b>12,5 (V)</b>	Superfícies de ligação de flanges de tubagens com junta macia.
(...) - Valores recomendados de segunda escolha (série Renard R' 10)	

Até 1992, os valores do parâmetro,  $R_a$ , eram escolhidos, normalmente, a partir da série de valores indicada no quadro 10.11 (série Renard R' 10/3). Nos desenhos antigos, a rugosidade,  $R_a$ , podia também ser indicada pelos números dos graus de rugosidade, dados no mesmo quadro. A utilização desta progressão geométrica de razão 2 era justificada pelo facto de, com a utilização de padrões de comparação visotátil de rugosidade (ver exemplos nas figuras 10.22), mesmo o pessoal do controlo mais experiente só conseguia distinguir claramente duas rugosidades diferentes, se uma delas tivesse um valor que fosse o dobro ou metade do valor da outra.

Quadro 10.11 – Comparação entre o desvio médio aritmético,  $R_a$ , e os números dos graus de rugosidade

N 12	N 11	N 10	N 9	N 8	N 7	N 6	N 5	N 4	N 3	N 2	N 1	
50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	$\mu\text{m}$

Com a generalização da utilização dos rugosímetros (ou perfilómetros de contacto), passou a ser possível verificar a especificação de qualquer valor numérico para os diferentes parâmetros de rugosidade, embora continue a ser corrente recorrer-se aos valores, recomendados para os parâmetros de rugosidade (em  $\mu\text{m}$ ), constituintes da série Renard R' 10.

### 10.16.1 Algumas relações práticas entre parâmetros de rugosidade e as tolerâncias dimensionais

A representação do estado de acabamento das superfícies não fornece qualquer indicação sobre a qualidade (grau de tolerância) das dimensões (tamanhos) das peças. No entanto, é evidente que uma qualidade dimensional elevada não se pode conciliar com superfícies grosseiramente trabalhadas. Existem várias relações práticas, algumas delas a seguir indicadas, que relacionam as rugosidades adequadas com as tolerâncias dimensionais especificadas. No entanto, deve ter-se em conta que a aplicação rígida de uma dessas relações pode conduzir à exigência de estados de superfície que não são indispensáveis ao bom comportamento mecânico ou à duração de vida das peças em serviço, o que, não sendo necessário, aumenta inutilmente o preço das peças.

Começando pelas relações que fornecem os valores de  $R_a$  de qualidade mais elevada, baseadas nas recomendações do Memento da Afpa [M2] e nas indicações da norma UNI 3963:1960, [M1, O1], apresentadas no quadro 10.12, verifica-se que ambas fornecem valores praticamente idênticos, quando utilizadas em superfícies de elementos de tamanho de dimensões com graus de tolerância entre IT6 e IT14. Os valores de  $R_a$  são de melhor qualidade, mas também mais caros, quando comparados com os resultantes da aplicação de outras relações práticas menos conservadoras.

**$R_a \approx IT / 30$**

Relação recomendada pelo Memento da Afpa [M2]



Quadro 10.12 – Valores máximos de  $R_a$  compatíveis com as tolerâncias ISO, na ausência de prescrições particulares ( $R_a \approx IT / 30$ ), baseados na norma UNI 3963:1960, [M1, p. 23 e O1]

Valores de rugosidade média aritmética, $R_a$ , compatíveis com as tolerâncias ISO [ $\mu\text{m}$ ]										
Graus de tolerância ISO	Intervalos de dimensões (tamanhos) nominais [mm]									
	$d_n \leq 3$		$3 < d_n \leq 18$		$18 < d_n \leq 80$		$80 < d_n \leq 250$		$d_n > 250$	
	Tol.	$R_a$	Tol.	$R_a$	Tol.	$R_a$	Tol.	$R_a$	Tol.	$R_a$
IT6	6	0,2	8 ÷ 11	0,3	13 ÷ 19	0,5	22 ÷ 29	0,8	32 ÷ 40	1,2
IT7	10	0,3	12 ÷ 18	0,5	21 ÷ 30	0,8	35 ÷ 46	1,2	52 ÷ 63	2,0
IT8	14	0,5	18 ÷ 27	0,8	33 ÷ 46	1,2	54 ÷ 72	2,0	81 ÷ 97	3,0
IT9	25	0,8	30 ÷ 43	1,2	52 ÷ 74	2,0	87 ÷ 115	3,0	130 ÷ 155	5,0
IT10	40	1,2	48 ÷ 70	2,0	84 ÷ 120	3,0	140 ÷ 185	5,0	210 ÷ 250	8,0
IT11	60	2,0	75 ÷ 110	3,0	130 ÷ 190	5,0	220 ÷ 290	8,0	320 ÷ 400	12
IT12	100	3,0	120 ÷ 180	5,0	210 ÷ 300	8,0	350 ÷ 460	12	520 ÷ 630	20
IT13	140	5,0	180 ÷ 270	8,0	330 ÷ 460	12	540 ÷ 720	20	810 ÷ 970	–
IT14	250	8,0	300 ÷ 430	12	520 ÷ 740	20	870 ÷ 1150	–	1300 ÷ 1550	–

Por sua vez, J. Girard [G1], do CETIM, apresenta, no quadro 10.13, valores de  $R_a$  recomendados para superfícies de veios, de diâmetros com graus de tolerância entre IT5 e IT9, e para as superfícies de furos, de diâmetros com graus de tolerância entre IT6 e IT10. Em média, os valores indicados correspondem a uma relação  $R_a \approx IT/20$ .

Quadro 10.13 – Valores de  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) recomendados para as superfícies de contacto, em função das dimensões (tamanhos) nominais e da qualidade dimensional [G1, p. 54]

Diâmetro nominal $\varnothing$ [mm]	Graus de tolerância ISO normalizados (IT)				
	5 – 6 (*)	6 – 7 (*)	7 – 8 (*)	8 – 9 (*)	9 – 10 (*)
Acima – Até incl.	Valores de $R_a$ em $\mu\text{m}$				
1 – 3	0,20 – 0,32	0,32 – 0,63	0,50 – 0,80	0,63 – 1,00	1,25 – 2,0
3 – 6	0,25 – 0,40	0,40 – 0,63	0,63 – 1,00	0,80 – 1,25	1,60 – 2,50
6 – 10	0,32 – 0,50	0,50 – 0,80	0,80 – 1,25	1,00 – 1,60	2,00 – 3,20
10 – 18	0,40 – 0,63	0,63 – 1,00	1,00 – 1,60	1,25 – 2,00	2,50 – 4,00
18 – 30	0,40 – 0,80	0,80 – 1,25	1,25 – 2,00	1,60 – 2,50	3,20 – 5,00
30 – 50	0,50 – 0,80	1,00 – 1,60	1,25 – 2,00	1,60 – 2,50	4,00 – 5,00
50 – 80	0,63 – 1,00	1,00 – 1,60	1,60 – 2,50	2,00 – 3,20	4,00 – 6,30
80 – 120	0,63 – 1,00	1,25 – 2,00	2,00 – 3,20	2,50 – 4,00	5,00 – 6,30
120 – 180	0,80 – 1,25	1,25 – 2,00	2,50 – 3,20	2,50 – 4,00	6,30 – 8,00
180 – 260	1,00 – 1,60	1,60 – 2,50	2,50 – 4,00	3,20 – 5,00	6,30 – 10,0
260 – 360	1,00 – 1,60	1,60 – 2,50	3,20 – 5,00	3,20 – 5,00	8,00 – 12,5
360 – 500	1,25 – 2,00	2,00 – 3,20	3,20 – 5,00	4,00 – 6,30	10,0 – 12,5

(\*) O primeiro número corresponde ao grau de tolerância dos **veios** e o segundo ao dos **furos**.  
 No caso de pequenos diâmetros, o valor de  $R_a$  aconselhado no quadro é inferior a 1  $\mu\text{m}$  (p. ex. 10 h6  $\rightarrow R_a = 0,5 \mu\text{m}$ ). Na prática, a rugosidade especificada pelos gabinetes de estudos e normalmente executada é superior a este valor.  
 Baseado em S. Enache – “La qualité des surfaces usinées”, Dunod, 1972.  
 Em média, os valores indicados são  $R_a \approx IT/20$ .

Mais recentemente, L. Mummery [M4] propôs relações entre graus de tolerância dimensionais (IT), estabelecidos para tamanhos de elementos geométricos, e parâmetros de rugosidade,  $R_a$  e  $R_z$ (DIN), adequados às suas superfícies que conduzem à especificação de valores mais elevados para os parâmetros de rugosidade em questão:

$$IT / 20 \leq R_a \leq IT / 8$$

[M4, p. 94].

$$R_z(\text{DIN}) < IT / 2$$

Os valores de  $R_a$  e  $R_z$ (DIN), resultantes da aplicação destas duas expressões, podem ser visualizados agrupados no quadro 10.14 e conduzem a processos de fabricação menos dispendiosos.

Quadro 10.14 – Seleção de valores máximos de  $R_a$  e  $R_z$  compatíveis com as tolerâncias ISO, na falta de prescrições particulares [M4, p. 94]

Tamanho nominal em mm	1 – 6		6 – 10		10 – 18		18 – 80		80 – 250		250 – 500	
Graus de tolerância ISO	Valores recomendados de Ra e Rz(DIN) em µm											
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
IT5	0,4	2,5	0,4	2,5	0,8	4,0	0,8	4,0	0,8	6,3	0,8	6,3
IT6	0,8	4,0	0,8	4,0	0,8	4,0	0,8	6,3	1,6	10	1,6	10
IT7	0,8	6,3	0,8	6,3	0,8	6,3	1,6	10	1,6	16	1,6	16
IT8	1,6	6,3	1,6	10	1,6	10	3,2	16	3,2	25	3,2	25
IT9	1,6	10	3,2	16	3,2	16	3,2	16	3,2	25	6,3	40
IT10	3,2	16	6,3	25	6,3	25	6,3	40	6,3	40	12,5	63
IT11	6,3	25	12,5	40	12,5	40	12,5	63	12,5	63	25	100

Finalmente, A. Chevalier [C2] avança com uma relação entre graus de tolerância dimensionais (IT), de tamanhos de elementos geométricos, e parâmetros de rugosidade,  $R_a$ , que permite a utilização de processos de fabricação ainda mais baratos, ao promover a possibilidade de especificação de valores de  $R_a$  mais elevados:

$$R_a < IT / 10 \quad [C2, p. 55]$$

Na literatura técnica, podem também encontrar-se relações entre graus de tolerância dimensionais (IT) e outros parâmetros de rugosidade. J. Girard [G1], do CETIM, por exemplo, apresenta as seguintes relações envolvendo a “altura total do perfil de rugosidade”,  $R_t$ :

$$R_t \approx IT / 2 \quad (\text{para tolerâncias} > 10 \mu\text{m}) \quad [G1, p. 54]$$

$$R_t \approx IT / 4 \quad (\text{para tolerâncias} < 10 \mu\text{m})$$

Por sua vez, vários documentos normativos, elaborados no âmbito da indústria automóvel francesa (CNOMO/R E40.72.114.N:1983, RENAULT 01-10-302:1983 e CNOMO GE40-084N:2000), baseados no “método dos motivos”, preconizam as seguintes relações baseadas na “profundidade média dos motivos de rugosidade”,  $R$ :

$$R = IT / 2 \quad (\text{para } IT > 7)$$

$$R = IT / 4 \quad (\text{para } IT \leq 7)$$

## 10.17 Símbolos de rugosidade utilizados em desenhos antigos

Nos desenhos anteriores a 1969, data da edição do Inquérito de Norma Portuguesa I-976, que passou a incorporar conceitos das então recomendações ISO/R 1302 e ISO/R 468, utilizavam-se símbolos de superfície sem valores numéricos (ver exemplos na figura 10.4), cuja posterior conversão para valores de  $R_a$  e  $R_z$ , feita a partir da antiga norma DIN 3141, é indicada no quadro 10.15.

Quadro 10.15 – Conversão dos antigos símbolos de rugosidade em valores de  $Ra$  e  $Rz$  (DIN 3141)

Símbolos de superfície	▽				▽▽				▽▽▽				▽▽▽▽			
Séries	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
$Rz$ em $\mu m$	160	100	63	25	40	25	16	10	16	6,3	4	2,5	-	1	1	0,4
$Ra$ em $\mu m$	25	12,5	6,3	3,2	6,3	3,2	1,6	1,6	1,6	0,8	0,4	0,2	-	0,1	0,1	0,025
Grau de rugosidade	N11	N10	N9	N8	N9	N8	N7	N7	N7	N6	N5	N4	-	N3	N3	N1

Adicionalmente, utilizava-se também o símbolo  $\sim$  sobre uma superfície, para especificar que àquela apenas se aplicavam requisitos de maior uniformidade e de aparência melhorada. Nas superfícies sem quaisquer símbolos de rugosidade, considerava-se que os métodos de fabricação convencionais eram adequados e asseguravam a condição final requerida. Uma das principais debilidades apontadas a estes símbolos era o facto de não dizerem nada acerca do processo de fabricação.

O documento NP I-976 propunha uma correspondência dos símbolos baseada na série 2 do quadro 10.15, com a utilização do símbolo  $\sim$  para valores de  $Ra \geq 25 \mu m$  e uma ausência de qualquer símbolo para valores de  $Ra \geq 50 \mu m$ .

## 10.18 Regras de base para a determinação do valor do comprimento de onda de corte (“cut-off”) para a medição de parâmetros do perfil de rugosidade

Quando o **comprimento de base** (“*sampling length*”),  $l_r$ , está indicado no requisito especificado no desenho ou na documentação técnica do produto, o **valor do comprimento de onda de corte** (“*cut-off wavelength*”),  $\lambda_c$ , deve ser escolhido igual ao comprimento de base especificado (ver secção 10.10.3 deste texto). Na ausência de uma especificação de rugosidade ou quando esta não comporta a indicação do comprimento de base, o valor do comprimento de onda de corte a adotar deve ser escolhido com base nos procedimentos indicados na norma ISO 4288.

Se a orientação de medição não estiver especificada no desenho (por meio de planos de interseção, de acordo com os exemplos das figuras 10.39 e 10.40), o plano de medição, normal à superfície, deve ser orientado perpendicularmente às estrias da mesma, de modo a possibilitar a obtenção dos maiores valores dos parâmetros  $Ra$  e  $Rz$ . Em superfícies isotrópicas, essa orientação pode ser arbitrária. As medições devem ser levadas a cabo na zona da superfície onde se espera que venham a ser obtidos os valores mais críticos. Essa escolha pode ser feita através de um exame visual prévio. Para que os resultados da medição possam ser independentes, devem ser feitas medições separadas, igualmente distribuídas pela zona da superfície em causa.

Por sua vez, para efetuar a determinação dos valores dos parâmetros do perfil de rugosidade **R** (ver exemplos no quadro 10.3) especificados no desenho, deve começar-se por examinar a superfície da peça, com vista a determinar se o seu **perfil de rugosidade é periódico ou não periódico**.

a) Procedimento para um perfil de rugosidade não periódico

A partir do valor do parâmetro de rugosidade **R**, a medir, especificado no desenho, começar por estimar o valor do parâmetro **Ra**, **Rz**, **Rz1max** ou **RSm** da superfície em análise, por exemplo, através de um controlo visual da superfície da peça, por meio da utilização de padrões de comparação visotátil de rugosidade ou por intermédio da análise gráfica de um registo do perfil total, de modo a adotar, para início do processo de medição, o valor de **lr** correspondente à combinação relevante, indicada nos quadros 10.16 ou 10.17.

Quadro 10.16 – Comprimentos de base para a medição de parâmetros de rugosidade **R** e para as curvas e parâmetros associados, em perfis não periódicos (p. ex. perfis em superfícies obtidas por retificação, por conformação plástica, etc.). Adaptada da ISO 4288

Parâmetro <b>Ra</b> ( $\mu\text{m}$ )	Parâmetro <b>Rz, Rz1max</b> ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento de base da rugosidade <b>lr</b> (mm)	Comprimento de avaliação da rugosidade <b>ln</b> (mm)
$(0,006) < Ra \leq 0,02$	$(0,025) < Rz, Rz1max \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	$0,1 < Rz, Rz1max \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	$0,5 < Rz, Rz1max \leq 10$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	$10 < Rz, Rz1max \leq 50$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	$50 < Rz, Rz1max \leq 200$	8	40
<b>Ra</b> é utilizado aquando da medição dos parâmetros <b>Ra</b> , <b>Rq</b> , <b>Rsk</b> , <b>Rku</b> e <b>RΔq</b> . <b>Rz</b> é utilizado aquando da medição dos parâmetros <b>Rz</b> , <b>Rv</b> , <b>Rp</b> , <b>Rc</b> e <b>Rt</b> . <b>Rz1max</b> é utilizado, apenas, aquando da medição de <b>Rz1max</b> , <b>Rv1max</b> , <b>Rp1max</b> e <b>Rc1max</b> .			

Se o valor medido do parâmetro **Ra**, **Rz**, **Rz1max** ou **RSm**, previamente escolhido, cair fora do intervalo de valores correspondente ao valor de **lr** adotado, fazer uma nova regulação do instrumento de medição para o valor (maior ou menor) de **lr** correspondente, no quadro, ao valor medido desse parâmetro e efetuar uma segunda medição, que deverá fornecer valores de **Ra**, **Rz**, **Rz1max** ou **RSm** dentro do intervalo correspondente, indicado nos quadros 10.16 ou 10.17.

Em seguida, fazer uma terceira medição utilizando um valor **lr** imediatamente inferior ao usado no passo anterior, salvo se este novo valor inferior tiver já sido usado anteriormente. Caso se justifique esta nova medição, verificar se o valor de **Ra**, **Rz**, **Rz1max** ou **RSm**, assim obtido, se enquadra também numa das combinações indicadas no quadro 10.16 ou 10.17.

Se apenas o resultado da segunda medição se enquadrar numa das combinações indicadas nos quadros 10.16 ou 10.17, o correspondente valor **lr** deve ser considerado como o correto. Mas, se a terceira medição fornecer um resultado para **Ra**, **Rz**, **Rz1max** ou **RSm** que satisfaça também uma das combinações existentes nos quadros 10.16 ou 10.17, dever-se-á adotar

como valor do comprimento de onda de corte,  $\lambda_c$ , para a medição do parâmetro  $R$ , o valor  $l_r$  mais baixo de entre os dois comprimentos de base em questão.

Com o **comprimento de onda de corte**,  $\lambda_c$  (comprimento de base,  $l_r$ ) estimado deste modo, pode então obter-se uma medida representativa do(s) parâmetro(s)  $R$  pretendido(s).

#### b) Procedimento para um perfil de rugosidade periódico

Começar por estimar graficamente o parâmetro,  $RSm$  (ver figura 10.28), na superfície em que se pretende determinar a rugosidade.

Com base no quadro 10.17, determinar o valor recomendado para o comprimento de base,  $l_r$ , correspondente ao parâmetro,  $RSm$ , atrás estimado.

Se necessário, em casos de conflito, medir o valor de  $RSm$ , na peça, utilizando o comprimento de base,  $l_r$ , anteriormente selecionado. Caso o valor de  $RSm$  medido corresponda, no quadro 10.17, a um comprimento de base,  $l_r$ , menor ou maior do que o utilizado, adotar esse novo valor de  $l_r$  para o processo de medição.

Quadro 10.17 – Comprimentos de base para a medição de parâmetros de rugosidade  $R$  de perfis periódicos (p. ex. perfis em superfícies obtidas por torneamento, fresagem, aplainamento, etc.) e de  $RSm$  em perfis periódicos e não periódicos (ISO 4288)

Parâmetro $RSm$ (mm)	Comprimento de base da rugosidade $l_r$ (mm)	Comprimento de avaliação da rugosidade $l_n$ (mm)
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

Com o **comprimento de onda de corte** (comprimento de base,  $l_r$ ) estimado deste modo, pode então obter-se uma medida representativa do(s) parâmetro(s)  $R$  (ver exemplos no quadro 10.3) pretendido(s).

## 10.19 Regras e processos para a avaliação do estado de superfície pelo método do perfil (ISO 4288:1996)

### 10.19.1 Procedimento simplificado para a verificação da rugosidade

Neste texto, faz-se referência a um dos vários métodos de verificação da rugosidade das superfícies das peças. Este procedimento é apenas uma aproximação do procedimento completo definido no corpo principal da norma ISO 4288:1996.

### 10.19.2 Exame visual

Realização de um exame visual das superfícies da peça, para selecionar aquelas onde é óbvio que não será necessária uma verificação através de métodos mais precisos, porque, por exemplo, a rugosidade é obviamente melhor ou claramente pior do que a especificada, ou porque a superfície apresenta um defeito que influencia significativamente a função da superfície em análise.

Se o exame visual não permitir que seja tomada uma decisão, poderão ser efetuadas comparações táteis e visuais com o apoio de padrões de comparação visotátil de rugosidade.

### 10.19.3 Ensaio de medição

Se o exame de comparação não permitir que seja tomada uma decisão, dever-se-ão efetuar medições na zona da superfície onde, de acordo com o exame visual, podem ser esperados os valores críticos.

**Se o símbolo do parâmetro de rugosidade indicado não englobar o sufixo “max”**, a superfície será aceite e o procedimento de ensaio interrompido se:

- o primeiro valor medido não exceder 70 % do valor especificado (valor indicado no desenho);
- os primeiros três valores medidos não excederem o valor especificado;
- apenas um dos primeiros seis valores medidos (< 16 %) exceder o valor especificado;
- apenas dois dos primeiros doze valores medidos (< 16 %) excederem o valor especificado;

caso contrário, a peça deve ser rejeitada.

Por vezes, por exemplo, antes de serem rejeitadas peças de valor elevado, poderão ser efetuadas mais do que doze medições, por exemplo 25 medições, em que apenas quatro delas (16 %), no máximo, poderão exceder o valor especificado.

**Se o símbolo do parâmetro de rugosidade indicado englobar o sufixo “max”**, geralmente são efetuadas pelo menos três medições, ou na zona da superfície em que são esperados os valores mais elevados (por exemplo, onde for visível uma estria particularmente profunda), ou dispostas igualmente espaçadas, se a superfície der uma impressão de homogeneidade. Nenhum dos valores medidos deve exceder o valor especificado.

Os resultados mais fiáveis da verificação da rugosidade são obtidos através da utilização de instrumentos de medição. Por isso, a verificação de detalhes críticos deverá ser efetuada usando, desde o início, instrumentos de medição.

## 10.20 Relações entre parâmetros de perfil e parâmetros de superfície (“areal”) dos estados de superfície

### 10.20.1 Generalidades

Os estados de superfície têm sido tradicionalmente definidos a partir de perfis, devido às limitações técnicas inicialmente existentes. Com o desenvolvimento tecnológico entretanto registado, os instrumentos de medição de superfícies passaram a estar muito mais acessíveis, começando a verificar-se uma mudança de paradigma da avaliação de perfis para a avaliação de superfícies, com o consequente desenvolvimento da atual série de normas ISO 25178 relativas ao estado superfície (“areal”).

A experiência acumulada com os métodos do perfil permite fazer uma comparação entre valores de parâmetros ligados ao perfil da superfície e valores de parâmetros de superfície (“areal”). A norma ISO 25178-3 fornece alguns conselhos e orientações sobre as relações e diferenças entre as definições e valores dos parâmetros do perfil de superfície e dos parâmetros de superfície (“areal”).

### 10.20.2 Operação de filtragem

A maior diferença entre os métodos do perfil e de superfície (“areal”) é o tipo de filtragem utilizada. Um perfil extraído de uma superfície S-L ou S-F (ver normas ISO 25178-2 e -3) não é matematicamente o mesmo do que um perfil medido em conformidade com a cadeia de normas relativas ao perfil do estado de superfície. Esta última utiliza um filtro de perfil (com filtragem apenas na direcção transversal que é perpendicular à orientação das estrias), enquanto a primeira utiliza um filtro de superfície (“areal”) (filtragem em ambas as direcções *x* e *y* que poderão, ou não, estar relacionadas com a orientação das estrias), pelo que podem produzir resultados muito diferentes, mesmo com os “mesmos” tipos de filtro e de “*cut-off/nesting index*”.

Na prática, algumas superfícies podem ser muito semelhantes com filtros de perfil e com filtros de superfície (“areal”), mas é aconselhável tomar as devidas precauções. O utilizador deve ter um bom conhecimento das diferenças e semelhanças entre os efeitos derivados dos filtros de perfil e dos filtros de superfície (“areal”), ao nível da superfície em consideração. Quais os elementos afetados por essas diferenças e a que escala? Têm importância para a comparação em causa?

Para minimizar as diferenças, recomenda-se:

- que a orientação da zona retangular da superfície, na qual são realizadas as medições, seja alinhada com as estrias da superfície;
- que seja utilizado um filtro gaussiano com um valor de corte (“*cut-off value*”) pertencente à série de valores indicados, por omissão, na cadeia de normas relativas ao perfil do estado de superfície, nomeadamente na norma ISO 3274;

- que sejam utilizados outros valores, por omissão, indicados na cadeia de normas relativas ao perfil do estado de superfície, se necessários para utilização, tais como o raio da extremidade do apalpador,  $r_{tip}$ , o intervalo de amostragem, etc.;
- que o comprimento da direção "transversal" da zona retangular da superfície seja igual a cinco vezes o comprimento de corte.

### 10.20.3 Outras considerações

Apenas os parâmetros de superfície ("areal") que têm um parâmetro de perfil equivalente direto podem ser comparados. Por exemplo, a "altura média quadrática da superfície" ( $S_q$ ) pode ser comparada com o parâmetro de rugosidade ( $R_q$ ), mas o "fator de forma do estado de superfície" ( $S_{tr}$ ) – medida da isotropia espacial ou direcionalidade do estado de superfície (ver ISO 25178-2 e ASME B46.1) – não tem qualquer equivalente de perfil e, por isso, não pode ser comparado com qualquer outro parâmetro de perfil.

Os parâmetros de estado da superfície que caracterizam os extremos da superfície [isto é, a "altura máxima de pico" ( $S_p$ ), a "profundidade máxima da cavidade" ( $S_v$ ), a "altura máxima da superfície à escala limitada" ( $S_z$ ) etc. (ver ISO 25178-2)] tendem a ter valores medidos maiores, obtidos com base em parâmetros de superfície ("areal") do que com parâmetros de perfil equivalentes, uma vez que os "picos" e "vales" presentes num perfil passam quase sempre nos flancos de um pico ou vale e não sobre as suas extremidades verdadeiras.

Não é recomendável utilizar os valores medidos de um parâmetro de superfície ("areal") equivalente para fazer comparações com especificações de tolerâncias de perfil. Geralmente, os valores medidos a partir de parâmetros equivalentes de perfil e de superfície estão correlacionados, mas não são diretamente comparáveis, em sentido absoluto, pelas razões atrás aduzidas.

Por fim, dever-se-á ter em conta que a maioria dos instrumentos de medição do perfil do estado de superfície se baseia no método de contacto por apalpador ("stylus"), e que a maioria dos instrumentos de medição de estados de superfície ("areal") se apoia em abordagens sem contacto. A diversidade no tipo de sondagem das superfícies pode também levar a diferenças entre os valores medidos a partir do perfil ou da superfície.

## 10.21 Considerações finais

O estudo da influência dos estados de superfície, sobretudo ao nível da sua microgeometria, tem vindo a registar progressos significativos, desde a década de 20 do século passado. No entanto, só nos anos 50, com o aparecimento de instrumentos de medição fiáveis, para aplicações de âmbito industrial, este domínio de conhecimento passou ter grande relevância a nível internacional [L1, W1].



Neste contexto, as superfícies podem ser abordadas com base em dois aspetos distintos mas que são complementares. Por um lado, através da consideração do seu papel importante para a funcionalidade dos mecanismos e, por outro, recorrendo à sua utilização para o controlo e avaliação do desempenho dos processos de fabricação [W2].

Os desvios de forma e a ondulação verificados na superfície da uma peça são, normalmente, derivados de defeitos registados ao nível da máquina-ferramenta e da fixação da peça. Por sua vez, a rugosidade é um resultado direto, por exemplo, da escolha dos avanços da ferramenta, das velocidades de corte e da geometria da ferramenta. Logo, o estado de superfície é uma impressão digital do processo produtivo. O seu controlo aumenta o conhecimento do processo e, por conseguinte, permite a sua alteração, se necessária [M4].

Os métodos de medição dos estados de superfície podem ser classificados, genericamente, em métodos com contacto ou métodos sem contacto e em métodos bidimensionais (métodos do perfil) ou métodos tridimensionais (de superfície – “*area*”).

Na realidade, a medição de uma superfície qualquer deveria ser quase sempre tridimensional. No entanto, as dificuldades envolvidas, de início, na realização de tais medições, levaram a que as várias definições fossem consideradas num plano bidimensional onde eram mais fáceis de apreender, dando origem ao designado “método do perfil” [O1].

Não é possível caracterizar a geometria de uma superfície apenas através de um único parâmetro, salvo se o objetivo for o controlo da deriva de um determinado processo de fabricação [C1]. Após um período longo em que o único parâmetro utilizado, em muitas das indústrias, era o parâmetro *Ra*, atualmente, os modernos aparelhos de medição acoplados a computadores pessoais e os avanços significativos registados nas técnicas de filtragem permitem efetuar uma abordagem muito mais funcional das superfícies, pondo ao dispor dos utilizadores uma grande diversidade de parâmetros caracterizadores, que alguns autores consideraram até um pouco exagerada [B3, S4].

Por outro lado, as superfícies estão a tornar-se cada vez mais importantes, sobretudo com o desenvolvimento da miniaturização e com o advento dos micromecanismos, onde há necessidade de dar resposta a um conjunto de novas funções. As micro e nanogeometrias são importantes, não só em componentes miniaturizados, mas também em grandes componentes, cujas funções são otimizadas através de estruturas especificamente adaptadas à escala micrométrica e nanométrica.

Os parâmetros de estado de superfície, em conformidade com a norma ISO 4287, que antes, por vezes, tinham apenas como objetivo o controlo da duração de vida das ferramentas de corte, hoje em dia são as características de qualidade mais importantes para a descrição dos elementos de superfície não determinísticos, no intervalo dos micro e nanómetros [W1].

Em termos de métodos de medição, para além dos métodos por apalpação e óticos clássicos, nas últimas décadas, desenvolveu-se uma nova geração de métodos, com e sem contacto, que permitiu

estender a avaliação dos estados de superfície do domínio bidimensional (métodos do perfil) para o domínio tridimensional (superfícies). Estes métodos de medição podem ser classificados em “métodos de topografia de superfícies” e “métodos de integração de superfícies”, em conformidade com a ISO 25178-6, e deram origem ao estabelecimento de novos parâmetros de superfície (“*areal*”), definidos na ISO 25178-2.

Contudo, apesar da alta resolução e dos dados de medição geométrica globais que passaram a estar disponíveis, em muitos casos, não é possível fazer uma afirmação cabal sobre a capacidade funcional da topografia da peça, porque os conceitos tradicionais de cotagem e toleranciamento são apenas orientados para a geometria e os parâmetros normalizados não são suficientes para considerarem a interação com parâmetros não geométricos. Nestes casos, torna-se necessário relacionar variáveis geométricas com variáveis não geométricas, o que torna a especificação e verificação geométricas mais complexas e difíceis, em termos da decisão de conformidade orientada para a função [H1, W1].

A especificação simples de parâmetros caracterizadores dos estados de superfície, indicados por exemplo nas normas ISO 4287 (método do perfil) e ISO 25178-2 (métodos de superfície), não é, por si só, suficiente para caracterizar os requisitos de novas funções técnicas. A nova linguagem de “Especificação geométrica de produtos” (GPS), ao substituir a indicação de zonas de tolerância simples por especificações geométricas definidas como um conjunto ordenado de operações (designado de **operador**), está a tentar elaborar uma linguagem conceptualmente muito mais rica [N1, W1].

No entanto, deve ser assinalado que a ideia de representar uma medição em termos de uma série de operações e de definir uma especificação como uma “prescrição” para uma medição tinha sido expressa, pela primeira vez, pelo então ISO/TC 57 – “*Metrology and properties of surfaces*”. Logo, a definição de uma especificação geométrica do estado de superfície, na documentação técnica de produtos, como um conjunto ordenado de operações, que pode ser considerado como uma instrução virtual de medição, em que cada operação e os seus parâmetros definidores são passos do processo de medição, não é mais do que um desenvolvimento estruturado de uma prática tradicional neste domínio [N1].

A título de exemplo, registe-se que uma peça-padrão homogénea com um estado de superfície definido apenas através de um parâmetro de perfil pode ser avaliada com uma incerteza de medição da ordem de 10 %. No entanto, essa incerteza pode ultrapassar os 20 %, se a superfície não for homogénea, atendendo aos fatores de influência em presença. Com instrumentos de medição de marcas e modelos diferentes, os desvios entre os resultados obtidos podem atingir os 15 %, para os parâmetros ligados aos motivos do perfil, e 30 %, para os parâmetros de perfil ligados à linha média [C1].

Nos casos das especificações de requisitos de estados de superfície com vista à sua avaliação por intermédio de métodos de medição tridimensionais (“*areal*”), estas são também definidas, explicitamente, em termos de conjuntos ordenados de operações. De acordo com a norma ISO 25178-3, um operador de especificação completo inclui todas as operações necessárias para o estabelecimento de uma relação inequívoca entre a especificação do estado de superfície e a função dessa superfície, sendo constituído por um conjunto completo e ordenado de operações de especificação. No caso dos estados de superfície (“*areal*”), o operador de especificação completo define o tipo de superfície, o método de extração, o método de associação e o método de filtragem.

A maior diferença entre os métodos do perfil e de superfície (“*areal*”) é o tipo de filtragem utilizada. Apenas os parâmetros de superfície (“*areal*”) que têm um parâmetro de perfil equivalente direto podem ser comparados. Geralmente, os valores medidos a partir de parâmetros equivalentes de perfil e de superfície estão correlacionados, mas não são diretamente comparáveis, em termos absolutos.

Finalmente, como a maioria dos instrumentos de medição do perfil do estado de superfície se baseia no método de contacto por apalpador (“*stylus*”), e a maioria dos instrumentos de medição de estados de superfície (“*areal*”) se apoia em abordagens sem contacto, esta diversidade de tipos de sondagens das superfícies pode também contribuir para as diferenças entre os valores medidos a partir do perfil ou da superfície.

## 10.22 Referências

- [A1] – ABBOTT, E.J.; F.A. FIRESTONE. – *Specifying surface quality: a method based on accurate measurement and comparison*. Mechanical Engineering. 1933, 55, p. 569–572.
- [A2] – AYEL, M. J. – *Influence des paramètres métallurgiques et géométriques sur l'usure dans les moteurs récents*. Ing. de l'automobile. 1982, 6, Set. Oct, p. 82-98.
- [B1] – BENNICH, P.; NIELSEN, H. – *An overview of Geometrical Product Specifications* [Em linha]. IfGPS. 2005, 12 p. [Consult. 22 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.ifgps.com/An%20Overview%20of%20GPS.pdf>>.
- [B2] – BERTHE, D.; FLAMAND, L.; FERREIRA, L. – *Conditions de Lubrification d'un Engrenage. Relations avec les Avaries de Surface*. Jornadas Ibéricas de Tribologia. Lisboa: IST. 1983. 26 p.
- [B3] – BOULANGER, J. – *Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface* [Em linha]. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, B 7010. Paris: France. 1991. 27 p. [Consult. 5 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[ftp://80.14.158.64/2.Documents/2.3.Documents\\_Techniques/2.3.7.Les%20Techniques%20de%20l'ingenieur/B%20et%20C/B7010.pdf](ftp://80.14.158.64/2.Documents/2.3.Documents_Techniques/2.3.7.Les%20Techniques%20de%20l'ingenieur/B%20et%20C/B7010.pdf)>.
- [B4] – BRENNAN, J. K. – *Algorithms for Surface Texture Profiles and Parameters* [Em linha]. U.K.: University of Huddersfield. 2010. 153 p. Doctoral thesis. [Consult. 5 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://eprints.hud.ac.uk/8759/1/jkbrennanfinalthesis.pdf>>.
- [C1] – CHAILLIE, A. – *États de surface – État de l'art*. Contrôle Industriel. 1997, nº 204. Também publicado em *Spécification géométrique des produits (GPS) – Tome 2: États de surface*. France: AFNOR, 1999, p. XIII-XXVI.

- [C2] – CHEVALIER, J. – *Guide du Dessinateur Industriel*. 2<sup>ème</sup>. Paris: Hachette Technique. 1998.
- [D1] – DOWSON, D.; TOYODA, S. – A Central Film Thickness Formula for Elastohydrodynamic Line Contacts. Proc. of 5th Leeds-Lyon Symposium on Tribology on 'Elastohydrodynamics and Related Topics'. D. Dowson; C.M. Taylor; M. Godet; D. Berthe, eds., Mechanical Engineering Publications, Bury St. Edmunds Suffolk. 1979, p. 104-115.
- [D2] – DUDLEY, D.W. – *Handbook of Practical Gear Design*. USA: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [G1] – GIRARD, J. – *Opérations de finition en tournage et fraisage – 1<sup>re</sup> partie: Les états de surface en mécanique*. CETIM Informations. France. 1979, 60, p. 50-57.
- [G2] – GOHAR, R. – *Elastohydrodynamics*. U.K.: Ellis Horwood Ltd, 1988.
- [H1] – HARTMANN, W. ; WECKENMANN, A. – *Function-Oriented Dimensional Metrology – More than Determining Size and Shape* [Em linha]. Proceedings of the AMA – Association for Sensors and Measurement Conferences 2013 – SENSOR 2013. DOI 10.5162/sensor2013/B6.1, p. 285-290. [Consult. 3 jul. 2014] Disponível em WWW:URL: <<http://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ama-science.org%2Fproceedings%2FgetFile%2FZGHkZD%3D%3D&ei=6FTGU4WUB-fY0QXch4C4CQ&usq=AFQjCNE88gd3rss22y5N5rkje4V8mKezwm&bvm=bv.71126742,d.ZGU>>.
- [H2] – HENRIOT, G. – *La Lubrification des Engrenages*. In "La Lubrification Industrielle. Transmissions, compresseurs, turbines". Paris: Ed. Technip, 1984, cap. 4, p. 297-385, tome I.
- [H3] – HENZOLD, H. – *Geometrical Dimensioning And Tolerancing for Design, Manufacturing And Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. 2<sup>a</sup> ed. U.K.: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 978-0-7506-67388
- [J1] – JOHNSON, K.L.; GREENWOOD, J.A.; POON, S.Y. – *A simple theory of asperity contact in eld lubrication*. Wear. 1982, 19, p. 91-108.
- [L1] – LUK'YANOV, V. S.; ÉIDINOV, V. Ya. – *Activity and scientific tasks of the ISO/TC-57 on the "Quality of Machined Surfaces"* [Em linha]. Measurement Techniques. 1967, Vol. 10, No. 6, p. 656-659. [Consult. 29 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://link.springer.com/article/10.1007%2F00980652#>>.
- [M1] – MANFÈ, G.; POZZA, R.; SCARATO, G. – *Desenho Técnico Mecânico*. S. Paulo: Hemus-Livraria Edit. Ltda, vol 2, 1977.
- [M2] – *Mémento des Conventions de Dessin en Mécanique*. – Formation Professionnelle des Adultes. Ministère du travail. Afpa – Association Nationale pour la Formation Professionnelle des Adultes. Montreuil: AFPA. 1976.
- [M3] – MONTEIRO BAPTISTA, A.; ANDRADE FERREIRA, L. – *O Estado Geométrico das Superfícies Técnicas: A Importância da Rugosidade*. Revista Tecnometal. Porto: AIMMN. 1986, 46, p.19-33.
- [M4] – MUMMERY, L. – *Surface Texture Analysis. The Handbook*. West Germany: Hommelwerke GmbH, 1990.
- [M5] – MURALIKRISHNAN, B.; RAJA, J. – *Computational Surface and Roundness Metrology*. London: Springer-Verlag London Limited, 2009. ISBN 978-1-84800-296-8.

- [N1] – NIELSEN, H.S. – *Specifications, operators and uncertainties* [Em linha]. 8th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing – Managing Geometric Uncertainty in the Product Lifecycle. April 28-29, 2003, Univ. of North Carolina, Charlotte, USA. [Consult. 25 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://isotc213.ds.dk/article/CIRP%20Specifications%20operators%20and%20uncertainties.pdf>>.
- [O1] – OLSEN, K. V. – *On the Standardization of Surface Roughness Measurements* [Em linha]. Brüel & Kjær Technical Review. 1961, No. 3, p. 3-32. [Consult. 29 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.bksv.com/doc/TechnicalReview1961-3.pdf>>.
- [P1] – PIKE, R. J.; THOMAS, J. R. – *Quantitative Characterization of Micro-topography – A Bibliography of Industrial Surface Metrology* [Em linha]. Open-File Report 98-768. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. 1998, 145 p. [Consult. 5 mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://pubs.usgs.gov/of/1998/0768/report.pdf>>.
- [R1] – RAJA, J.; MURALIKRISHNAN, B.; FU, S.; LIU, X. – *Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form* [Em linha]. Precision Engineering. 2002, vol. 26, nº 2, p. 222-235. [Consult. 29 out. 2012]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.aspe.net/publications/Annual\\_2000/PDF/PAPERS/SURFFORM/RAJA2.PDF](http://www.aspe.net/publications/Annual_2000/PDF/PAPERS/SURFFORM/RAJA2.PDF)>.
- [R2] – RIOU, J. – *Les États de Surface: Description, Élaboration, Mesure*. Notes Techniques du CETIM. CETIM. 1979, 18.
- [S1] – SAINOT, Ph. – *Analyse du Contact Entre Dentures d' Engrenages Cylindriques de Reducteurs*. Lyon: INSA. 1989. 205 p. Thèse de Doctorat.
- [S2] – SEABRA, J.; BERTHE, D. – *Influence of surface waviness and roughness on the normal pressure distribution in the Hertzian contact*. Journal of Tribology. 1987, vol. 109, p. 462-470.
- [S3] – SECCO, A. R.; VIEIRA, E.; GORDO, N. – *Rugosidade. Parâmetros de rugosidade*. In Apostilha de Metrologia – Telecurso 2000, cap. 18 e 19, ([www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/](http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/)).
- [S4] – STOUT, K. J.; BLUNT, L. – *Three-Dimensional Surface Topography* [Em linha]. 2ª ed. Elsevier Ltd, 2000. ISBN: 978-1-85718-026-8. [Consult. 3 abr. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.sciencedirect.com/science/book/9781857180268>>.
- [W1] – WECKENMANN, A.; HARTMANN, W. – *Function-oriented Measurements – the Path from Macro to Micro and Nano Range* [Em linha]. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Manufacturing Engineering Society International Conference. Zaragoza. June 2013, 10 p. [Consult. 3 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://mesic2013.unizar.es/proceedings/documents/244.pdf>>.
- [W2] – WHITEHOUSE, D. J. – *Surface Characterization and Roughness Measurement in Engineering* [Em linha]. In “Photo-mechanics”. Edit. P. K. Rastogi. Topics in Applied Physics, vol. 77. Germany: Springer-Verlag, 2000. ISSN: 1437-0859. [Consult. 7 jun. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://download.springer.com/static/pdf/334/bok%253A978-3-540-48800-2.pdf?auth66=1411569428\\_72114bd0983b65542bcb1caab1f7860e&ext=.pdf](http://download.springer.com/static/pdf/334/bok%253A978-3-540-48800-2.pdf?auth66=1411569428_72114bd0983b65542bcb1caab1f7860e&ext=.pdf)>.
- [W3] – WHITEHOUSE, D. J. – *Surfaces and their Measurement* [Em linha]. Elsevier Ltd, 2002. ISBN: 978-1-903996-01-0. [Consult. 3 abr. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.sciencedirect.com/science/book/9781903996010>>.
- [W4] – WHITEHOUSE, D. J. – *Handbook of Surface and Nanometrology* [Em linha]. U.K.: Institute of Physics Publishing Ltd, 2003. ISBN 0 7503 0583 5. [Consult. 3 abr. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.tex.tuiasi.ro/biblioteca/carti/CARTI/NanoScience/NanoTechnology/Handbook%20of%20Surface%20and%20Nanometrology,%202003,%20p.1128.pdf>>.

- [Y1] – YAN, W.; SCOTT, P. J.; JIANG, X. – *The Structure of Surface Texture Knowledge* [Em linha]. Journal of Physics: Conference Series, 13 (2005) 1-4 [doi:10.1088/1742-6596/13/1/001](https://doi.org/10.1088/1742-6596/13/1/001). 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. UK: IOP Publishing Ltd. [Consult. 3 abr. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://iopscience.iop.org/1742-6596/13/1/001/pdf/1742-6596\\_13\\_1\\_001.pdf](http://iopscience.iop.org/1742-6596/13/1/001/pdf/1742-6596_13_1_001.pdf)>.

### 10.22.1 Normalização

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| ASME B46.1-2009                 | – Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay). ASME.  |
| DIN 3141:1978                   | – Surface symbols in drawings; assignment of peak-to-valley heights. DIN (entretanto anulada).   |
| DIN 4760:1982                   | – Form deviations; Concepts; Classification system. DIN.   |
| DIN 4762:1989                   | – Surface Roughness – Terminology – Surface and its parameters; identical with ISO 4287-1:1984. DIN (em alemão, anulada com a publicação da DIN EN ISO 4287).  |
| DIN 4768:1990                   | – Determination of Surface Roughness Values of the Parameters Ra, Rz, Rmax by means of Electric Contact (Stylus) Instruments; Terminology, Measuring Conditions. DIN (em alemão, anulada em 1999; edição em língua inglesa de 1974). |
| DIN 4768. Part 1. Suppl. 1:1978 | – Determination of Surface Roughness Values Ra, Rz, Rmax with Electric Stylus Instruments. Conversion of parameter Ra to Rz and vice versa. DIN.   |
| GE40-084N:2000                  | – Guide de capitalisation pour la caracterisation et la mesure des états de surface en complement à la normalisation. CNOMO.   |
| ISO 468:1982                    | – Rugosité de surface – Paramètres, leurs valeurs et les règles générales de la détermination des spécifications. ISO (anulada em 1998-04-10, após a publicação da ISO 4287:1997).   |
| ISO 1101:2012+Cor.1:2013        | – Geometrical product specifications (GPS) -- Geometrical tolerancing -- Tolerances of form, orientation, location and run-out. ISO.   |
| ISO 1302:2002                   | – Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation. ISO.  |
| ISO 1302:2002/DAmD 2:2010       | – Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation – Amendment 2: Indication of material ratio requirements. ISO (retirado).  |
| ISO 2632-1:1985                 | – Roughness comparison specimens – Part 1: Turned, ground, bored, milled, shaped and planed. ISO (anulada em 1997-03-20).  |
| ISO 2632-2:1985                 | – Roughness comparison specimens – Part 2: Spark-eroded, shot-blasted and grit-blasted, and polished. ISO (anulada em 1997-03-20).   |
| ISO 2632-3:1979                 | – Roughness comparison specimens – Part 3: Cast surfaces. ISO (anulada em 1993-03-25).   |
| ISO 3274:1996                   | – Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments. ISO.   |
| ISO 4287:1997                   | – Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters. ISO.   |
| ISO 4287:1997/Amd 1:2009        | – Peak count number. ISO.  |
| ISO 4287:1997/DAmD 2:2013       | – Parameters Xsm and Xc. ISO (retirado em 2014-11-22).   |

ISO 4288:1996	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture. ISO.
ISO 8785:1998	– Geometrical Product Specification (GPS) – Surface imperfections – Terms, definitions and parameters. ISO.
ISO/TR 10064-4:1998	– Code of inspection practice – Part 4: Recommendations relative to surface texture and tooth contact pattern checking. ISO.
ISO 11562:1996	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters. ISO (anulada em 2011-05-27 e substituída pela ISO 16610-21:2011).
ISO 12085:1996	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Motif parameters. ISO.
ISO 13565-1:1996	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties - Part 1: Filtering and general measurement conditions. ISO.
ISO 13565-2:1996	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties – Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve. ISO.
ISO 13565-3:1998	– Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties – Part 3: Height characterization using the material probability curve. ISO.
ISO 16610-1:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 1: Overview and basic concepts. ISO.
ISO 16610-20:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 20: Linear profile filters: Basic concepts. ISO.
ISO 16610-21:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters. ISO.
ISO 16610-22:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 22: Linear profile filters: Spline filters. ISO.
ISO/TS 16610-28:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 28: Profile filters: End effects. ISO.
ISO 16610-29:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 29: Linear profile filters: Spline wavelets. ISO.
ISO 16610-30:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 30: Robust profile filters: Basic concepts. ISO.
ISO/TS 16610-31:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 31: Robust profile filters: Gaussian regression filters. ISO.
ISO/TS 16610-32:2009	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 32: Robust profile filters: Spline filters. ISO.
ISO 16610-40:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 40: Morphological profile filters: Basic concepts. ISO.
ISO 16610-41:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 41: Morphological profile filters: Disk and horizontal line-segment filters. ISO.
ISO 16610-49:2015	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 49: Morphological profile filters: Scale space techniques. ISO.
ISO 16610-60:2015	– Geometrical Product Specification (GPS) – Filtration – Part 60: Linear areal filters -- Basic concepts. ISO.

ISO 16610-61:2015	– Geometrical Product Specification (GPS) – Filtration – Part 61: Linear areal filters – Gaussian filters. ISO.
ISO 16610-71:2014	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 71: Robust areal filters: Gaussian regression filters. ISO.
ISO 16610-85:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 85: Morphological areal filters: Segmentation. ISO.
ISO 17450-1:2011	– Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 1: Model for geometrical specification and verification. ISO.
ISO 17450-2:2012	– Geometrical product specifications (GPS) – General concepts – Part 2: Basic tenets, specifications, operators, uncertainties and ambiguities. ISO.
ISO 25178-1:2016	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 1: Indication of surface texture. ISO.
ISO 25178-2:2012	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. ISO.
ISO 25178-3:2012	– Geometrical Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 3: Specification operators. ISO.
ISO 25178-6:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 6: Classification of methods for measuring surface texture. ISO.
ISO 25178-70:2014	– Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal – Part 70: Material measures. ISO.
ISO 25178-71:2012	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 71: Software measurement standards. ISO.
ISO/DIS 25178-71	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 71: Software measurement standards. ISO.
ISO/DIS 25178-72	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 72: XML file format x3p. ISO.
ISO 25178-601:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 601: Nominal characteristics of contact (stylus) instruments. ISO.
ISO 25178-602:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 602: Nominal characteristics of non-contact (confocal chromatic probe) instruments. ISO.
ISO 25178-603:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 603: Nominal characteristics of non-contact (phase-shifting interferometric microscopy) instruments. ISO.
ISO 25178-604:2013	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 604: Nominal characteristics of non-contact (coherence scanning interferometry) instruments. ISO.
ISO 25178-605:2014	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal -- Part 605: Nominal characteristics of non-contact (point autofocus probe) instruments. ISO.
ISO 25178-606:2015	– Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal – Part 606: Nominal characteristics of non-contact (focus variation) instruments. ISO.
ISO 25178-701:2010	– Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 701: Calibration and measurement standards for contact (stylus) instruments. ISO.



- 
- |                            |  |
|----------------------------|--|
| NF E 05-015:1972           | – État de Surface des Produits – Prescriptions – 1 <sup>o</sup> Généralités, terminologie, définitions. AFNOR. (anulada em 1982).  |
| NP I-976:1969 + Anexo:1969 | – Desenho técnico – Especificação do estado de acabamento de superfícies nos desenhos + Anexo – Esclarecimentos à cerca das características de rugosidade de superfícies. IPQ (inquérito que nunca chegou a ser publicado como norma). |
| STD 28: 1996               | – Guidelines for choice of surface roughness. SAAB.  |
- Spécification géométrique des produits (GPS) - Tome 2: États de surface. France: AFNOR, 1999.



# **CAPÍTULO 11**

## **Conclusões**



## Capítulo 11

### Conclusões

#### 11.1 Considerações finais

Ao longo do século XX, com o advento da produção em massa, a necessidade de ter capacidade para fabricar peças em conformidade com as especificações e com um grau elevado de repetibilidade foi-se tornando cada vez mais importante, tendo estado na origem das ações promovidas com vista à obtenção de consensos no âmbito da formalização dos métodos utilizados na especificação de peças, apoiada em desenhos de engenharia portadores de dimensões e tolerâncias, bem como do desenvolvimento de novos métodos para a especificação de características geométricas (tolerâncias geométricas) e estados de superfície (nomeadamente valores de rugosidade).

Os países mais industrializados, Reino Unido, Estados Unidos da América, Alemanha, França, etc., começaram por elaborar normas nacionais de modo a regular os métodos utilizados em especificações de engenharia, tendo, posteriormente, sido acompanhados, nessa tarefa, por muitos outros países. A evolução e o desenvolvimento deste tipo de metodologias, registados ao longo do último século, têm ganho uma nova dinâmica, nestas primeiras décadas do século XXI, com a introdução de novas normas e o desenvolvimento e a revisão de outras.

No âmbito da ISO, os Organismos Nacionais de Normalização de muitos países têm trabalhado em conjunto no desenvolvimento e harmonização das diversas normas utilizadas em especificações de engenharia e na promoção de uma abordagem comum, com vista a melhorar a comunicação técnica, indo ao encontro das necessidades de uma economia cada vez mais global.

Atendendo ao modo como esta metodologia foi evoluindo e se desenvolveu, ao longo dos últimos 80 anos, há ainda muitas áreas em que as normas para especificações de engenharia são (ou pelo menos foram até há pouco tempo) ambíguas, inadequadas, incompletas e mesmo contraditórias. Estas questões têm sido sublinhadas por vários desenvolvimentos levados a cabo e incluem:

- melhorias na exatidão com que uma peça pode ser fabricada;
- melhorias na exatidão com que uma dada peça pode ser medida ou controlada;
- a tendência do mundo desenvolvido para se concentrar na conceção e montagem, subcontratando a fabricação de componentes a fornecedores que são, muitas vezes, estrangeiros e podem não falar a mesma língua (esta tendência, em particular, eliminou a

opção da comunicação informal ou "entendimento" que, muitas vezes, se verificava entre a conceção e a fabricação, quando estas eram departamentos vizinhos, na mesma empresa);

- os requisitos de sistemas CAD, CAM e CAQ responsáveis pelas definições matemáticas formais de todas as operações de especificação e verificação que podem ser codificadas em programas de computador.

Em resposta a esta situação, a ISO iniciou um projeto, na primeira metade da década de 90, com o objetivo de desenvolver um sistema coerente, abrangente e completo para a especificação geométrica de peças. Este sistema é designado de **“Especificação geométrica de produtos”** (GPS).

Como o nome sugere, a GPS ocupa-se com a geometria das peças mas não trata das propriedades materiais ou das condições de funcionamento. Concretamente, a GPS lida com a especificação e a verificação de tamanhos, formas e características de superfície de uma peça, de modo a garantir o cumprimento dos requisitos funcionais desta.

A GPS é uma nova abordagem para a especificação de produtos, mas baseia-se em ferramentas já existentes, em particular na utilização de referências especificadas, tolerâncias geométricas e toleranciamento dos estados de superfície. A “Especificação geométrica de produtos” sistematiza e alarga estas ferramentas existentes a uma nova metodologia.

## 11.2 Síntese e conclusões extraídas do trabalho desenvolvido

O trabalho desenvolvido teve em consideração os atuais e os previsíveis desenvolvimentos registados ao nível das normas ISO sobre “Especificação geométrica de produtos” que estão já a ter um forte impacto na indústria nacional, em face da magnitude das alterações verificadas, e que obrigarão a um incremento na formação da mão-de-obra industrial e dos estudantes das escolas superiores, nestes domínios.

A elaboração deste trabalho pretendeu contribuir para colmatar a lacuna, a nível nacional, resultante da não existência de um documento de síntese atualizado neste domínio, que permitisse apoiar a generalidade das pequenas e médias empresas (PMEs) nacionais, que produzem produtos transacionáveis de elevado valor acrescentado, para o mercado global, e que se envolvem muitas vezes em litígios com os seus clientes e fornecedores, sobre os resultados da verificação da conformidade ou da não conformidade dos produtos, derivados de especificações ambíguas existentes na documentação técnica.

O trabalho apresentado permite estabelecer algumas considerações e extrair as seguintes conclusões

- A existência de um acervo documental atualizado, nos domínios do “Desenho técnico” e dos “Elementos de ligação mecânicos”, em língua portuguesa, é uma condição importante para

permitir alargar a difusão destes conhecimentos de base, ao nível das atividades industriais e de desenvolvimento de produtos, fundamentalmente em termos das PME, e ao nível das atividades de formação. O facto de não haver um tal acervo no domínio da “Especificação geométrica de produtos” pode ser considerado como um fator penalizador para o desempenho das PME nacionais ao nível do desenvolvimento de produtos.

- No nosso País, é cada vez maior o número de empresas que se confrontam com a necessidade de dispor de competências próprias no domínio do desenvolvimento de produtos, de modo a poderem ser competitivas ao nível do mercado global. Só com o conhecimento e aplicação das normas nos domínios GPS e TPD, harmonizadas internacionalmente, é possível estabelecer um sistema de **“Especificação técnica de produtos”** (TPS) adequado ao contexto internacional, que permita otimizar a atribuição de recursos entre a especificação, a fabricação e a verificação.
- No atual mercado global, os engenheiros e os técnicos em geral devem possuir conhecimentos de representação gráfica cada vez mais sólidos, de modo a poderem fazer face ao uso crescente de meios de comunicação gráfica, que tornam mais fácil a circulação da informação técnica. O Desenho técnico é uma linguagem gráfica normalizada, a nível mundial, que permite estabelecer a comunicação técnica entre todos os ramos da Engenharia. Neste contexto, a **“Documentação técnica de produtos”** (TPD), que engloba os diversos tipos de desenhos técnicos, é o único meio oficial de comunicação e serve de base para a interpretação dos contratos.
- Com a utilização generalizada dos sistemas de CAD 3D, os **modelos virtuais de sólidos** tornaram-se responsáveis pela definição da geometria nominal dos produtos, que passou a ser uma função secundária (e redundante) dos desenhos de engenharia. No entanto, os **desenhos 2D** gerados a partir de modelos 3D são, atualmente, e continuarão a ser, num futuro previsível, muito utilizados, a nível industrial, atendendo aos limites da integração das fases de conceção, fabricação e verificação registados em muitas empresas.
- Apesar do contexto tecnológico descrito neste trabalho, a aptidão para fazer desenhos à mão livre, em folhas de papel, é uma competência muito importante em termos da representação gráfica em engenharia, pois permite desenvolver as capacidades de visualização espacial e de comunicação técnica – imaginar soluções construtivas, traduzindo-as em desenhos ilustrativos ou explicando-as a outros.
- A nova linguagem ISO de **“Especificação geométrica de produtos”** (GPS), em desenvolvimento, fornece as bases técnicas para uma abordagem integrada dos procedimentos de especificação e de verificação geométricas. A consideração das superfícies das peças constituídas por elementos geométricos e a classificação destes baseada no conceito matemático de **“grupo de simetria”** desempenham um papel determinante nesta nova linguagem.

- Através de conceitos como o de “**skin model**” e o de “**operadores**”, a nova linguagem GPS põe a descoberto a existência de conjuntos de operações duais, nos processos de especificação e de verificação, tornando possível harmonizar o conjunto de operações (anteriormente não referidas explicitamente) envolvidas nas especificações de tolerâncias com as operações utilizadas durante o controlo das peças.
- A generalização do **conceito de incerteza** pelas diferentes fases do processo de desenvolvimento de produtos permitirá uma melhor avaliação do grau de correlação entre a especificação e os requisitos funcionais, mas também das ambiguidades que existem na própria especificação e da incerteza da medição, transformando a incerteza numa ferramenta de gestão económica dos recursos a afetar aos diferentes setores da empresa (especificação, fabricação e verificação), com vista a promover a melhoria contínua da qualidade dos produtos e dos prazos de entrega.
- Na nova linguagem GPS, a aplicação do “**princípio de independência**” (ISO 8015) na definição do relacionamento entre as especificações dimensionais (lineares e angulares) e as especificações geométricas (de forma, de orientação e de posição), inscritas nos desenhos técnicos e documentos técnicos afins, adquiriu uma nova centralidade. No entanto, este princípio não deverá ser, geralmente, utilizado em elementos geométricos de peças cuja função seja o seu ajustamento com outros elementos de peças conjugadas, mas é suficiente para a maioria das situações em que este requisito não é necessário, com as consequentes vantagens económicas daí resultantes. A opção atual da ISO pelo “princípio de independência”, por omissão (“*by default*”), é uma das principais divergências face aos procedimentos da norma ASME Y14.5, que continua a especificar que os limites das dimensões “tamanhos” devem ser verificados através de meios que emulem o “**requisito de envolvente**” (*Rule #1*).
- Presentemente, verifica-se uma mudança de posição assinalável entre desvios dimensionais e desvios geométricos derivados da fabricação. Os desvios geométricos resultantes do processo produtivo podem ser da mesma ordem de grandeza ou relativamente maiores do que os correspondentes desvios dimensionais, de tal modo que dificultem a função da peça, bem como a cotagem e o toleranciamento dimensionais. Logo, os desvios geométricos de forma devem ser sujeitos a limitações maiores do que no passado, por via da especificação de **tolerâncias geométricas** adequadas, de modo a garantir-se uma correta função da peça e a relevância da cotagem e toleranciamento dimensionais. As normas mais recentes pretendem dar resposta às novas necessidades decorrentes do progresso tecnológico, desenvolvendo uma nova linguagem de especificação geométrica que permita uma diminuição significativa das ambiguidades de descrição da função e de especificação.
- A **especificação de tolerâncias  $\pm$  em quaisquer dimensões que não sejam “tamanhos” é um requisito ambíguo**, uma vez que não pode ser definida de um modo inequívoco em peças reais. Não existe uma solução universal para a resolução deste tipo de ambiguidades que resultam da existência, nas peças, de desvios geométricos de forma e angulares que, embora



não sejam limitados através do toleranciamento dimensional, influenciam o resultado da avaliação das dimensões em causa. Esta ambiguidade de especificação dá origem a que possa ser feita mais do que uma interpretação do requisito indicado num desenho ou modelo 3D. Uma caracterização inequívoca da especificação considerada mais adequada para a função pretendida só pode ser materializada através de **toleranciamento geométrico** que é uma linguagem mais robusta e com uma gramática mais desenvolvida.

- De acordo com o **princípio de independência**, por omissão, uma dimensão linear toleranciada, inscrita num desenho, limita apenas os tamanhos locais reais (tamanhos entre dois pontos opostos) de um **“elemento de tamanho”** (*“feature of size”*), mas não os seus desvios de forma. Na nova linguagem ISO, este tipo de tamanhos são definidos inequivocamente, em conformidade com a norma ISO 14660-2 (e a futura ISO 17450-3), por meio de procedimentos numéricos a implementar em máquinas de medição de coordenadas.
- A norma ISO 14405-1 estabelece o **“tamanho local entre dois pontos”** como especificação ISO geral, por omissão, para tamanhos lineares e fornece um conjunto adicional de ferramentas de especificação, nomeadamente um conjunto de símbolos modificadores para a indicação de especificações GPS especiais, no âmbito do estabelecimento de novos tipos de **tamanhos lineares**, que passaram a permitir uma definição com grande detalhe de diferentes requisitos funcionais em elementos de peças, para além da função de ajustamento. Neste contexto, deve ser referida a consideração de novos tipos de tamanhos (*“tamanhos por ordenação”*) de modo a dar resposta às necessidades dos fabricantes de rolamentos que se regem por princípios de toleranciamento particulares.
- Na atual linguagem ISO GPS, a especificação de uma dimensão do tipo *“tamanho linear”*, com base numa classe de tolerância codificada de acordo com o **“Sistema ISO de tolerâncias e desvios”** (ISO 286), em elementos de tamanho do tipo *“cilindro”* e do tipo *“duas superfícies planas paralelas opostas”*, passou a ser interpretada, por omissão, como sendo um *“tamanho entre dois pontos”*. Neste contexto, o termo **“intervalo de tolerância”** foi adotado em substituição da expressão *“zona de tolerância”*, que é mais adequada para exprimir uma noção de espaço ou de área. Logo, as classes de tolerância dos tamanhos destes tipos de elementos, destinados a preencher uma função de ajustamento entre peças conjugadas, passaram a ter de ser indicadas, nos desenhos, em conjunto com o símbolo modificador **ⓔ**, relativo ao **“requisito de envolvente”**, de modo a poderem traduzir adequadamente uma condição de montagem local.
- A nova norma ISO 14405-3 estabelece o **“tamanho angular entre duas linhas”** como especificação ISO geral, por omissão, para tamanhos angulares e fornece um conjunto substancial de novas ferramentas de especificação, nomeadamente um conjunto de símbolos modificadores para a indicação de especificações GPS especiais, relativas à caracterização de diversos tipos de **tamanhos angulares** em elementos das peças, de modo que diferentes requisitos funcionais possam vir a ser definidos com grande detalhe. Os novos conceitos

estabelecidos nesta norma só poderão ser verificados, adequadamente, através de sistemas de metrologia digital computadorizada, munidos de algoritmos para o ajuste numérico dos elementos associados aos elementos extraídos.

- **As dimensões toleranciadas que não sejam “tamanhos” são especificadas, de modo inequívoco, apenas no modelo nominal.** No entanto, quando a função das peças permite desvios para a forma maiores do que para o posicionamento do ponto mais saliente da superfície material, há um conjunto de processos produtivos correntes que beneficiam com a indicação de especificações de dimensões com desvios limites  $\pm$ , nomeadamente em **distâncias em que estão envolvidos apenas dois elementos**, apesar das inerentes ambiguidades desse procedimento. Por sua vez, as especificações de desvios limites  $\pm$ , em dimensões de ressaltos e distâncias para mais do que dois elementos, conduzem sempre a tolerâncias menores do que as resultantes do toleranciamento geométrico correspondente (ver ISO/TR 16570). Neste contexto, o posicionamento de elementos por meio de dimensões (distâncias) toleranciadas com desvios  $\pm$  deixou de ter um significado preciso, uma vez que ele deriva de uma visão geométrica simplificada e unidimensional.
- A noção de **tolerâncias geométricas** surgiu para permitir uma descrição melhor das características geométricas essenciais ao cumprimento dos diferentes requisitos funcionais dos produtos, alicerçada, fundamentalmente, em conceitos normalizados relativos a uma metrologia convencional, baseada em instrumentos de medição (“*hard gauging*”), a maioria dos quais estava ainda em vigor durante grande parte da primeira década do século XXI. Com a adoção do “princípio de independência” como princípio fundamental de toleranciamento, o toleranciamento geométrico viu ainda mais reforçada a sua importância, sobretudo ao nível da especificação geométrica de elementos de tamanho.
- No final da década de 80, a “crise metrológica” despoletada pela divergência entre os resultados do controlo de produção das peças, fornecidos pelos algoritmos numéricos residentes nas máquinas de medição de coordenadas (CMMs), e os obtidos através da metrologia convencional deu origem ao desenvolvimento de trabalhos com vista à racionalização e matematização dos toleranciamentos indicados na documentação técnica e da metrologia.
- Com os valores das tolerâncias dimensionais e geométricas de forma a poderem atingir uma magnitude tão pequena que a influência do estado de superfície (rugosidade), na sua avaliação, passa a ser significativa, o toleranciamento geométrico de forma realizado de modo tradicional, baseado em zonas de tolerância simples, torna-se inadequado, uma vez que o projetista fica impossibilitado de indicar, na especificação geométrica inscrita na definição do produto, até que ponto é que as características do estado de superfície (ondulação e rugosidade) deverão ser consideradas ou ignoradas na verificação de tolerâncias geométricas de forma.

- A definição de requisitos geométricos, através de zonas de tolerância simples, é suficiente para aplicações correntes com tolerâncias geométricas maiores do que 20  $\mu\text{m}$  e funciona bem para caracterizar a função de ajustamento que assegura a capacidade de montagem das peças, mas é menos adequada para a caracterização de outros requisitos funcionais, importantes na indústria moderna, tais como a resistência ao desgaste, a eliminação de fugas de fluidos e da ocorrência de gripagem em regime dinâmico, o comportamento a pressão elevada, as vedações metal-metal, a limitação de ruído em rolamentos, etc.
- A nova linguagem GPS em desenvolvimento permite definir uma especificação geométrica como um conjunto ordenado de operações (designado de **operador**) que, por sua vez, pode ser considerado como uma instrução virtual de medição, em que cada operação e os seus parâmetros definidores são passos do processo de medição.
- As normas ISO em vigor ou em fase de revisão, no domínio do “**toleranciamento geométrico**”, assentam numa linguagem GPS baseada em princípios matemáticos e numa metrologia digital computadorizada. A nova geração destas normas deverá vir a possibilitar, nomeadamente:
  - uma aplicação mais rigorosa do “princípio de independência”, na documentação técnica de produtos, que passou a ser empregue por omissão, devendo recorrer-se a símbolos modificadores da especificação apropriados, sempre que tal se justifique;
  - o estabelecimento de referências especificadas e sistemas de referências especificadas, com base na função da peça, a partir de superfícies pertencentes a todas as classes de invariância, de modo a permitir a restrição dos graus de liberdade necessária para a fabricação e verificação da peça;
  - a indicação de operadores de especificação especiais para as tolerâncias geométricas (de forma, de orientação, de posição) e para as referências especificadas e sistemas de referências especificadas, contemplando a possibilidade da inclusão de operações de filtragem e de associação, com vista a reduzir a correspondente ambiguidade (incerteza) da especificação;
  - a indicação de elementos geométricos auxiliares de modo a permitir estender, às peças reais, geometricamente imperfeitas, a interpretação de determinadas especificações inscritas nos desenhos 2D em representação ortográfica (com um significado teoricamente exato) e possibilitando a sua utilização simultânea em anotações realizadas em vistas axonométricas 3D, elaboradas em desenhos 2D, e em modelos virtuais 3D.
- A indicação de uma **operação de filtragem** pode ser utilizada para atenuar algum nível de detalhe num elemento, permitindo assim estabelecer a especificação que melhor defina os requisitos para os restantes pormenores da superfície. Filtros diversos removem diferentes tipos de pormenores e podem ser utilizados para melhorar a comunicação de funções distintas,

através da especificação geométrica. Alguns filtros tendem a menosprezar os extremos e a focar-se no nível médio da superfície, enquanto outros têm tendência a concentrar-se nos seus picos mais elevados ou nos seus vales mais profundos. A seleção do filtro que melhor descreve as necessidades funcionais de uma superfície dependente exclusivamente da função desta.

- A indicação de uma **operação de associação** pode ser necessária no âmbito da avaliação de desvios geométricos e do estabelecimento de referências especificadas. Tradicionalmente esta operação era efetuada com o auxílio de planos de traçagem e controlo, mandris, dispositivos de medição especiais, etc. No entanto, uma vez que a metrologia digital computadorizada se tornou o meio de referência, a nível industrial, para a verificação dimensional e geométrica de produtos, nomeadamente através da utilização de máquinas de medição de coordenadas (CMM) e de equipamento de varrimento laser, a operação de associação passou a ser abordada como um problema de otimização, com ou sem restrições, resolvido através de métodos numéricos.
- O **requisito de máximo de matéria** **(M)** e o **requisito de mínimo de matéria** **(L)** são **requisitos de interdependência entre tamanho e geometria** que permitem combinar duas especificações de tolerância independentes, aplicadas a um ou mais elementos de tamanho, num **requisito coletivo** que simula, de um modo mais exato, a função pretendida para a peça e diz respeito apenas ao elemento integral, relacionado com a(s) superfície(s) desse(s) elemento(s). A inscrição dos símbolos **(M)** ou **(L)** num dos compartimentos do indicador de tolerância geométrica muda completamente o significado da especificação, com a introdução da **noção de condição virtual** para o(s) elemento(s) toleranciado(s) e, se aplicável, para o(s) elemento(s) de referência. A atual norma ISO 2692 atribui uma grande importância a esta noção, enquanto “estado de um elemento associado” que não deve ser violado pela matéria da peça. Esta envolvente de forma perfeita permite descrever, de modo muito simples, a fronteira imposta pela condição funcional estabelecida.
- O **requisito de reciprocidade (RPR)**, introduzido na normalização internacional, em 2006, pode ser utilizado como um requisito adicional ao requisito de máximo de matéria **(M)** **(R)** ou ao requisito de mínimo de matéria **(L)** **(R)**. Este requisito permite um aumento da tolerância dimensional do elemento tamanho, de modo que o tamanho local possa tomar valores até ao limite do tamanho virtual, se os desvios geométricos não tirarem todo o partido da respetiva condição virtual. A especificação deste requisito é funcionalmente equivalente à especificação de uma tolerância geométrica 0 **(M)** ou 0 **(L)**. No entanto, ao invés desta, uma indicação do requisito de reciprocidade funciona como uma recomendação, para o fabricante, sobre a distribuição da tolerância total, em termos de tamanho e de características geométricas, facilitando a comunicação entre o planeamento da produção e a oficina (tolerância relacionada com a fabricação). Com a especificação do requisito **(R)**, poderão coexistir várias tolerâncias

correlacionadas com a fabricação, derivadas da mesma tolerância relacionada com a função, em conformidade com as necessidades de diferentes oficinas.

- A presente edição da norma ISO 2692 passou a centrar a sua atenção na **noção de condição virtual**, enquanto fronteira que não deve ser ultrapassada pela matéria da peça. É um documento baseado na prática industrial e nas tradições existentes que foi enriquecido com novos conceitos destinados a assegurar que as especificações e as indicações a inscrever nos desenhos, em termos de requisitos de interdependência, possam ser inequívocas, de modo a responder mais eficazmente aos novos desafios colocados no âmbito da globalização da produção.
- O conceito de **“tolerâncias gerais”** permitiu tornar o desenho num documento definitivo, sem haver a necessidade de o sobrecarregar com um número excessivo de especificações individuais pouco relevantes. Com o desenvolvimento da nova linguagem GPS, há uma tendência para restringir a utilização das tolerâncias dimensionais apenas às dimensões “tamanhos”, de modo a evitar as ambiguidades de especificação identificadas na ISO 14405-2, recorrendo, em alternativa, ao uso de tolerâncias geométricas gerais, em particular de tolerâncias de perfil de uma superfície, para a especificação da generalidade das restantes características geométricas das peças. A generalização, a nível industrial, da conceção da geometria nominal dos produtos baseada em modelos em CAD 3D, em que as dimensões nominais nem sempre estão visíveis no modelo ou em que as suas superfícies são “*splines*” ou foram definidas apenas em termos matemáticos, reforça a necessidade da utilização de tolerâncias geométricas gerais de perfil de uma superfície.
- No estudo da influência dos **estados de superfície**, sobretudo ao nível da sua microgeometria, as superfícies podem ser abordadas através da consideração do seu papel importante para a funcionalidade dos mecanismos ou recorrendo à sua utilização para o controlo e avaliação do desempenho dos processos de fabricação. O estado de superfície é uma impressão digital do processo produtivo. O seu controlo aumenta o conhecimento do processo e, por conseguinte, permite a sua alteração, se necessária.
- Os **métodos de medição dos estados de superfície** podem ser classificados, genericamente, em métodos com contacto ou métodos sem contacto e em métodos bidimensionais (métodos do perfil) ou métodos tridimensionais (de superfície – “*area*”). Para além dos métodos por apalpação e óticos clássicos, nas últimas décadas, desenvolveu-se uma nova geração de métodos que permitiu estender a avaliação dos estados de superfície do domínio bidimensional para o domínio tridimensional, tendo dado origem ao estabelecimento de novos parâmetros de superfície (“*area*”) definidos na ISO 25178-2.
- Não é possível caracterizar a geometria de uma superfície apenas através de um único parâmetro, salvo se o objetivo for o controlo da deriva de um determinado processo de fabricação. Atualmente, os modernos aparelhos de medição acoplados a computadores pessoais e os avanços significativos registados nas técnicas de filtragem permitem efetuar uma

abordagem muito mais funcional das superfícies, pondo ao dispor dos utilizadores uma grande diversidade de parâmetros caracterizadores.

- Com o desenvolvimento da miniaturização e o advento dos micromecanismos, é cada vez maior a influência das superfícies. As micro e as nanogeometrias são importantes, não só em componentes miniaturizados, mas também em grandes componentes, cujas funções são otimizadas através de estruturas especificamente adaptadas à escala micrométrica e nanométrica. Os parâmetros de estado de superfície, em conformidade com a norma ISO 4287, que antes, por vezes, tinham apenas como objetivo o controlo da duração de vida das ferramentas de corte, hoje em dia são as características de qualidade mais importantes para a descrição dos elementos de superfície não determinísticos, no intervalo dos micro e dos nanómetros.
- Contudo, apesar da alta resolução e dos dados de medição geométrica globais que passaram a estar disponíveis, em muitos casos, não é possível fazer uma afirmação cabal sobre a capacidade funcional da topografia da peça, porque os conceitos tradicionais de cotação e toleranciamento são apenas orientados para a geometria e os parâmetros normalizados não são suficientes para considerarem a interação com parâmetros não geométricos. Nestes casos, torna-se necessário relacionar variáveis geométricas com variáveis não geométricas, o que torna a especificação e verificação geométricas mais complexas e difíceis, em termos da decisão de conformidade orientada para a função.
- A especificação simples de parâmetros caracterizadores dos estados de superfície não é, por si só, suficiente para caracterizar os requisitos de novas funções técnicas. A nova linguagem de “Especificação geométrica de produtos” (GPS), ao substituir a indicação de zonas de tolerância simples por especificações geométricas definidas como um conjunto ordenado de operações (**operador**), está a tentar elaborar uma linguagem conceptualmente muito mais rica.
- A maior diferença entre os métodos do perfil e de superfície (“*areal*”) é o tipo de filtragem utilizada. Apenas os parâmetros de superfície (“*areal*”) que têm um parâmetro de perfil equivalente direto podem ser comparados. Geralmente, os valores medidos a partir de parâmetros equivalentes de perfil e de superfície estão correlacionados, mas não são diretamente comparáveis, em termos absolutos.
- Finalmente, como a maioria dos instrumentos de medição do perfil do estado de superfície se baseia no método de contacto por apalpador (“*stylus*”), e a maioria dos instrumentos de medição de estados de superfície (“*areal*”) se apoia em abordagens sem contacto, esta diversidade de tipos de sondagens das superfícies pode também contribuir para as diferenças entre os valores medidos a partir do perfil ou da superfície.

Em conclusão, neste trabalho, procurou-se transmitir uma visão geral sobre a evolução da nova linguagem de especificação geométrica de produtos que continua a desenvolver conceitos de modo a permitir:

- modelar o conhecimento relevante através da utilização de um método mais exato para expressar os requisitos funcionais das peças;
- utilizar especificações completas e bem definidas;
- aplicar estratégias de verificação integradas, de modo a facilitar a sua inclusão em sistemas 3D de CAD/CAM/CAQ (CMM).

O **Sistema de especificação técnica de produtos** em desenvolvimento, com o objetivo de facilitar a sua integração em sistemas 3D de CAD/CAM/CAQ, tornou-se assim no único meio estável de comunicação técnica no âmbito do **processo de desenvolvimento de produtos**.

### 11.3 Perspetivas para trabalho futuro

O trabalho de síntese desenvolvido no âmbito desta dissertação poderá servir de base à preparação de diferentes materiais (livro, textos e apresentações “PowerPoint”) para apoio à docência em unidades curriculares do ensino superior e em ações de formação para técnicos industriais, no domínio da “Especificação técnica de produtos”. Estas tarefas são consideradas, por vários autores, como muito importantes para a difusão dos conceitos veiculados pelas novas normas ISO de toleranciamento.

Alguns dos assuntos referidos neste trabalho podem ser objeto de um tratamento mais aprofundado e a abordagem realizada pode também ser estendida a outros tópicos complementares dos agora tratados, nomeadamente:

- Continuação do acompanhamento dos trabalhos de Normalização desenvolvidos, no seio da ISO, no âmbito da “Especificação técnica de produtos” e desenvolvimento de esforços para que venha a ser possível criar, em Portugal, um acervo documental atualizado no domínio da “Especificação geométrica de produtos”, em língua portuguesa.
- Abordagem mais aprofundada das operações de filtragem e de associação, nomeadamente através da implementação de algoritmos numéricos relativos a alguns dos métodos abordados, que permitam tratar dados recolhidos através de equipamentos de medição, existentes no DEMec\_INEGI.
- Desenvolvimento de conceitos no âmbito da cotagem e toleranciamento vetoriais.
- Controlo dos desvios geométricos em peças reais. Análise de resultados obtidos através de diferentes critérios de associação residentes nas máquinas de medição de coordenadas.
- Estudo de cadeias de cotas no âmbito na análise funcional de mecanismos.
- A importância do toleranciamento estatístico na produção em grandes séries.

Estas são apenas algumas das possíveis áreas de atuação que permitam consolidar e interligar os conceitos expostos com os métodos de verificação existentes no DEMec\_INEGI e nas empresas, de modo a apoiar a indústria nacional nos seus esforços para incorporar as mudanças registadas, de modo a diminuir os litígios que ocorrem frequentemente entre os departamentos de controlo de fabricação e de controlo de receção de empresas que trabalham em “*outsourcing*”.